

Dimensionierungsrelevante Prognose des Ermüdungsverhaltens von Asphalt mittels einaxialer Zug-Schwellversuche

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Konrad Mollenhauer
geboren am 22. Februar 1976
aus Wuppertal

Eingereicht am 08. Mai 2008
Disputation am 21. Juli 2008

1. Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. Michael Wistuba
2. Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. Rolf Leutner
3. Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. Frohmuth Wellner
Prüfer	Prof. Dr.-Ing. Dieter Dinkler
Prüfungsausschussvorsitzender	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Arand

Kurzfassung

Der Ermüdungswiderstand beeinflusst die Dauerhaftigkeit einer Asphaltbefestigung maßgebend. Der einaxiale Zug-Schwellversuch simuliert die kombinierte Beanspruchung aus kryogener Spannung infolge thermisch behinderten Schrumpfes sowie aus Biegebeanspruchung infolge Verkehrs. Diese schwellende Zugspannung bewirkt neben der Vergrößerung der viskoelastischen Dehnung auch progressiv zunehmende viskoplastische Verformung. In der Literatur wird dazu angemahnt, dass der herkömmlich zur Auswertung herangezogene Ermüdungseffekt, die Verringerung des Elastizitätsmoduls, durch den Aufbau großer Dehnungen verfälscht wird. In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass die im einaxialen Zug-Schwellversuch gemessene viskoplastische Dehnung ebenso aus der Materialermüdung resultiert wie das herkömmliche Auswertungskriterium Steifigkeits-Abnahme. Unter Anwendung des Burgers-Modells kann der Verlauf der viskoplastischen Dehnung berechnet werden, indem die ermüdungsbedingte Materialschädigung, abgeleitet aus dem Verlauf der viskoelastischen Dehnung, berücksichtigt wird. Aus Zug-Schwellversuchen unter Variation der Temperatur, der Belastungsfrequenz und der Beanspruchung werden Ermüdungsfunktionen abgeleitet, mit denen die Ermüdungsresistenz prognostiziert werden kann. Es wird gezeigt, dass die Schädigung infolge Ermüdung unabhängig von der zwischen 3 Hz und 10 Hz variierten Prüffrequenz ist, wenn ihr Verlauf über die Zeit dargestellt wird. So weisen neben den Ermüdungsfunktionen sowohl die bei gleicher Temperatur und Beanspruchung gemessene viskoplastische Dehnung als auch die Steifigkeit von der Frequenz im untersuchten Bereich unabhängige Verläufe auf. Durch die Einführung der Belastungsfrequenz in die Ermüdungsfunktionen kann der für die Dimensionierung notwendige Prüfaufwand mit einer nur geringen Einbuße an Präzision erheblich reduziert werden.

Abstract

The resistance against fatigue controls the service life of asphalt pavements. Besides the traffic-induced bending stress, so-called cryogenic tensile stress occurs at low and decreasing temperatures due to prohibited thermal shrinkage. The combination of both is simulated in laboratory by the uniaxial swelling tensile test. In this test, the asphalt specimen is subjected to a sinusoidal load, which is superposed by a constant tension stress. The asphalt's reaction on this permanent tension stress is the development of visco-plastic strain which eclipses the visco-elastic strain signal. The values of the visco-elastic strain signal are less than a tenth of the accumulating visco-plastic strain. In the international literature it is stated, that the fatigue effects can be hidden behind the substantial irreversible deformation. In this thesis it is shown that the courses of both strain signals can be interpreted as reaction to the same deterioration of the specimen by growth of fatigue cracks by using rheological model calculation. Thus the swelling tensile test is capable for the evaluation of the fatigue characteristics of asphalt material in laboratory. For the use in design and prognosis tools, fatigue functions are elaborated from the results of uniaxial swelling tests with variation of temperature, frequency and stress level. Besides the crack initiation and propagation, the course of stiffness can be used for the characterisation of the fatigue resistance. Further the results gained at varied frequencies (3, 5 and 10 Hz) showed, that the testing time controls the fatigue deterioration primarily. If the testing time is used as basis of evaluation, the numbers of endured load cycles as well as the courses of stiffness reduction and visco-plastic strain are indifferent of the frequency. By integrating the frequency inside the equation of the fatigue-function, the test effort can be reduced considerably.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Straßenwesen (ISBS) der Technischen Universität Braunschweig. Die Versuchsergebnisse konnten während der Bearbeitung zweier Forschungsprojekte FE 04.187/2001/AGB „Weiterentwicklung von Stoffmodellen zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen“, gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen und „Nachhaltiger Straßenbau: Bemessungsmodell zur Förderung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Straßenbauunternehmen“, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Wirtschaft erzielt werden.

Mein besonderer Dank gilt meinem Erstbetreuer Herrn Prof. Dr.-Ing. DI Michael Wistuba für sein großes Interesse an meiner Arbeit und seine fördernden Impulse am Ende der Bearbeitungszeit. In gleicher Weise danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Leutner für die jahrelange Unterstützung während meiner Tätigkeit am Institut. Für viele fachliche Diskussionen und interessante Einblicke möchte ich mich bei meinem Gutachter Herrn Prof. Dr.-Ing. Frohmuth Wellner bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Arand gilt mein Dank wegen seines immerwährenden Interesses an der Arbeit und vielen motivierenden Diskussionen. Meinem Prüfer Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Dinkler danke ich für faire Fragen während der Disputation.

Mein besonderer Dank gilt dem gesamten Team des ISBS, ohne deren Unterstützung die Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Besonders danke ich Herrn Dr.-Ing. Holger Lorenzl, der mir stets für alle Fragestellungen zur Seite stand. Meiner Kollegin Frau Dr.-Ing. Kerstin Schindler danke ich für ungezählte abendliche Diskussionen und vieles gemeinsames Brainstorming. Herrn Dipl.-Inform. Stephan Büchler möchte ich für die Unterstützung in den programmier-technischen Fragestellungen danken. Herrn Dipl.-Ing. Thomas Lobach danke ich für sein mechanisches Geschick mit den verwendeten Prüfmaschinen. Großer Dank gilt dem Labor-Team und Hiwis am ISBS für die Herstellung der vielen Asphalt-Probekörper und ihrer anschließenden Zerstörung.

Bei unserem Projektpartner der Professur für Straßenbau der TU Dresden und besonders bei Frau Dipl.-Ing. Christiane Weise, Frau Dr.-Ing. Sabine Werkmeister

und Herrn Dr.-Ing. Markus Oeser möchte ich mich für die vielen Anregungen und Diskussionen während zahlreicher Projekttreffen bedanken.

Herzlich bedanke ich mich bei allen Freunden und Verwandten, die meine Arbeit Korrektur gelesen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern für die liebevolle Unterstützung und Geduld während der langen Zeit der Ausbildung.

Mein tiefster Dank gilt meiner lieben Frau Renate, die durch ihre Liebe, Unterstützung und Ansporn einen entscheidenden Beitrag zur Fertigstellung dieser Arbeit geleistet hat.

Braunschweig, im August 2008

Konrad Mollenhauer

Inhalt

Kurzfassung.....	3
Abstract	4
Vorwort	5
Inhalt.....	7
1 Einleitung und Problemstellung	9
2 Asphalteigenschaften	13
2.1 Zusammensetzung von Asphalt.....	13
2.2 Aufbau von Asphaltbefestigungen	14
2.3 Beanspruchung von Asphaltbefestigungen.....	15
2.4 Rheologie von Asphalt	18
2.4.1 Rheologische Modelle zur Simulation des Verformungsverhaltens.....	18
2.4.2 Reaktion rheologischer Modelle bei konstanter Spannung	20
2.4.3 Reaktion rheologischer Modelle bei sinusförmiger Schwellbelastung ..	22
2.4.4 Vereinfachende Nomenklatur.....	29
2.4.5 Temperatur-Frequenz-Äquivalenz des Elastizitätsmoduls	29
2.5 Ermüdungsverhalten von Asphalt	30
2.5.1 Dissipierte Energie	31
2.5.2 Ermüdungsversuche	31
2.5.3 Schädigungsmodelle	34
2.5.4 Schädigung infolge Risswachstum.....	35
3 Untersuchungsprogramm	39
3.1 Untersuchte Asphalte.....	39
3.2 Zug- und Abkühlversuch	41
3.2.1 Prüfeinrichtung	41
3.2.2 Abkühlversuch.....	42
3.2.3 Zugversuch	43
3.2.4 Zugfestigkeitsreserve	43
3.2.5 Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche	44
3.3 Retardationsversuch	47
3.4 Zug-Schwellversuch.....	48
3.4.1 Beschreibung des Prüfverfahrens	48
3.4.2 Verfahren zur Versuchsauswertung	51

3.4.3	Versuchsergebnisse.....	53
3.4.4	Nutzung der Versuchsergebnisse für die Dimensionierung	57
3.4.5	Versuchsübersicht.....	59
4	Auswirkungen der Materialermüdung: Risswachstum und Bruch.....	60
4.1	Ergebnisse der Zug-Schwellversuche.....	60
4.2	Einfluss der Beanspruchung auf die ertragbare Lastwechselzahl.....	60
4.3	Einfluss der Frequenz / Belastungszeit auf die ertragbare Lastwechselzahl .	63
4.4	Einflüsse auf die Parameter der Ermüdungsfunktionen.....	65
4.5	Ermüdungsprognose.....	71
4.6	Reduzierung des Prüfaufwandes.....	75
4.6.1	Prognose mittels dehnungsabhängiger Ermüdungsfunktionen	75
4.6.2	Prognose mit spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen mit einheitlichen Exponenten	78
5	Auswirkungen der Materialermüdung: Abnahme der Steifigkeit.....	83
5.1	Absoluter Elastizitätsmodul und Phasenwinkel.....	83
5.2	Temperatur-Frequenz-Äquivalenz der Steifigkeit.....	86
5.3	Quasi-lineare Abnahme des absoluten E-Moduls.....	87
5.4	Verlauf des absoluten E-Moduls in der Schädigungsphase.....	93
6	Auswirkung der Materialermüdung: Bleibende Dehnung.....	95
6.1	Bleibende Dehnung im Zug-Schwellversuch	95
6.2	Dehnungsverlauf im Retardationsversuch	96
6.2.1	Anpassung der Dehnungsmessung mittels Burgers-Modells	97
6.2.2	Temperaturabhängigkeit der Burgers-Elemente	101
6.3	Bleibende Dehnungen infolge statischer und dynamischer Belastung	109
6.4	Ergebnis: Bleibende Dehnung infolge Ermüdung	111
6.5	Schlussfolgerung	118
7	Zusammenfassung.....	119
	Literatur	124
	Verwendete Formelzeichen	129
	Abbildungsverzeichnis.....	131
	Tabellenverzeichnis.....	137
	Anlagen	139

1 Einleitung und Problemstellung

Zur Sicherstellung der Mobilitätsbedürfnisse der heutigen Gesellschaft ist eine Verkehrsinfrastruktur notwendig, die den Individualverkehr und den Transport von Gütern sicher, schnell und umweltschonend ermöglicht. Die größten Anteile der Verkehrsleistung sowohl des Personenverkehrs (948,1 Mrd. Personenkilometer = 89,2 %) als auch des Güterverkehrs (362,9 Mrd. tkm = 70,3%) werden auf dem deutschen Straßennetz, das eine Länge von 231.000 km umfasst, abgewickelt [10]. Über 80 % der Straßen sind in Asphaltbauweise ausgeführt.

Neue Vertragsformen im Straßenbau führen dazu, dass die Nachfrage nach wirtschaftlich optimierten Fahrbahnbefestigungen ansteigt. Die bisher fast ausschließlich öffentlichen Baulastträger bauen Straßenbefestigungen, die abgestimmt auf klimatische und verkehrliche Verhältnisse eine möglichst lange Nutzungsdauer aufweisen sollen. Zur Dimensionierung werden die im Regelwerk „Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen“ (RStO) in der aktuellen Fassung von 2001 [14] aufgeführten Berechnungsverfahren benutzt, um die Beanspruchung auf die Straßenbefestigung abzuschätzen und Bauweisen auszuwählen, deren Eignung empirisch durch langjährige Erfahrung nachgewiesen ist. Eine sehr dick konzipierte Fahrbahnbefestigung führt zwar in der Regel zu einer langen Lebensdauer, ist jedoch aus volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht optimal gewählt.

In Funktionsbauverträgen baut und betreibt ein nach wirtschaftlichen Grundsätzen arbeitendes Unternehmen eine Straße für eine vorgegebene Laufzeit. Am Ende dieser Laufzeit muss die Befestigung bestimmte Anforderungen erfüllen. Betriebswirtschaftlich ist somit ein Straßenaufbau dann optimal, wenn er nach der Konzessionslaufzeit die geforderten Anforderungen gerade noch erfüllt. Ist der Zustand der Straße bei Übergabe an die öffentliche Hand besser als die geforderte Mindestqualität, war die Dimensionierung des privatwirtschaftlich arbeitenden Unternehmens nicht gewinnmaximiert. Durch diese betriebswirtschaftliche Denkweise werden neue Dimensionierungsverfahren erforderlich, mit denen die Nutzungsdauer mit hoher Prognosegenauigkeit und ausreichender Sicherheit bestimmt und optimiert werden kann. Durch die damit verknüpften Prognosemodelle wird die Möglichkeit geschaffen, das Gebrauchsverhalten innovativer Baustoffe und Befestigungen, die wegen der Abweichungen zum starren Vertragssystem bisher nicht ohne weiteres eingesetzt

werden konnten, im Vorfeld der Baumaßnahme zu prüfen und deren Tauglichkeit nachzuweisen.

Als Eingangsgrößen dieser Dimensionierungsverfahren dienen Materialkennwerte, mit denen das mechanische Verhalten der Baustoffe beschrieben wird. Eine für die Nutzungsdauer der Straßenbefestigung wichtige Baustoffeigenschaft ist der Widerstand gegen Ermüdung.

Zur Ermittlung dieser Eigenschaft stehen zahlreiche Versuchssystematiken zur Verfügung. Arand hat am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig in den 1980er Jahren in [2] das Auftreten von Längsrissen an der Oberfläche von Asphaltstraßen auf die bei tiefen Temperaturen auftretende Materialermüdung zurück geführt. Zur Prüfung der Resistenz eines Asphaltes gegen diese Schädigung entwickelte er den Zug-Schwellversuch, der dazu dient, das Ermüdungsverhalten von Asphalt vor allem bei tiefen Temperaturen zu bewerten [1]. Dieses Prüfverfahren ist geprägt durch die Superposition

- einer dynamisch schwingenden Beanspruchung, die die Belastung durch den fahrenden Verkehr simuliert, mit
- einer statisch wirkenden Spannung, die die für den Baustoff Asphalt spezifischen thermisch bedingten (so genannten kryogenen) Spannungen berücksichtigt.

Der Baustoff Asphalt reagiert auf diese Beanspruchung mit dem Aufbau viskoplastischer Dehnungen, die den Zuwachs viskoelastischer Dehnung überlagern, welcher in vielen Versuchssystematiken als Kriterium für den Ermüdungsschaden herangezogen wird. Wie Abbildung 1-1 zeigt, bewirkt die durch Ermüdung erzeugte Materialschädigung ab einer gewissen Lastwechselzahl einen überproportionalen Zuwachs beider Dehnungsanteile, wobei der Betrag der viskoplastischen Dehnung den des viskoelastischen Anteils um mehr als eine Zehnerpotenz übersteigt.

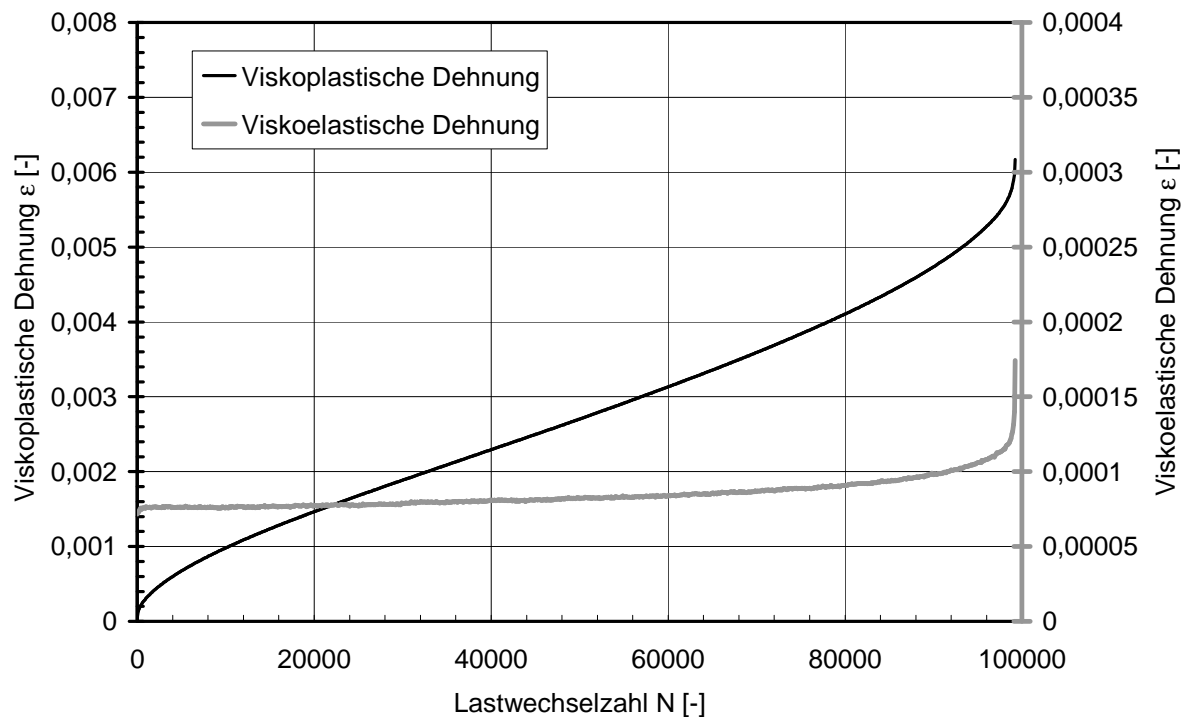


Abbildung 1-1: Viskoplastische und viskoelastische Dehnungsreaktion im Zug-Schwellversuch

In der vorliegenden Arbeit werden diese beiden Dehnungsanteile miteinander verknüpft, um nachzuweisen, dass das Versagen des im Zug-Schwellversuch geprüften Materials auf Ermüdung zurückzuführen und nicht – wie in der internationalen Literatur zu lesen (z.B. [11]) – Folge zu großer viskoplastischer Dehnungen ist.

Dazu wird zunächst ein Überblick über das mechanische Verhalten von Asphalt unter Zugbeanspruchung gegeben. Die für die Beanspruchungsart relevanten rheologischen Modelle und Ansätze zur Interpretation der Materialermüdung werden vorgestellt.

In zwei Forschungsvorhaben [24; 35] konnten insgesamt neun verschiedene Asphalte einem umfangreichen Untersuchungsprogramm unterzogen werden. Die auf der Zusammensetzung beruhenden (kompositionellen) Eigenschaften der untersuchten Asphaltvarianten, die verwendeten Prüfverfahren sowie die Methoden zu deren Auswertung werden in Kapitel 3 vorgestellt.

Die folgenden drei Kapitel widmen sich den einzelnen Ergebnissen, die zur Interpretation des Ermüdungsverhaltens herangezogen werden.

Zunächst wird in Kapitel 4 der Einfluss aus Belastungsregime und Material auf das durch Rissbildung verursachte Versagen herausgearbeitet. Durch Prüfung der Prognosequalität werden verschiedene Systematiken verglichen, mit denen aus den Ergebnissen von Zug-Schwellversuchen Ermüdungsfunktionen für die Verwendung im Rahmen der analytischen Dimensionierung gewonnen werden können.

Die Steifigkeit zu Beginn und ihre Abnahme während der Zug-Schwellversuche werden mit Hinblick auf die Auswirkung der ermüdungsinduzierten Materialschädigung in Kapitel 5 untersucht. Der gemessene Verlauf der viskoelastischen Dehnungen wird zur Berücksichtigung der Materialschädigung in rheologischen Modellen (Kapitel 6) benötigt.

Als drittes Ermüdungskriterium wird in Kapitel 6 der Verlauf der viskoplastischen Dehnung von Probekörpern in Zug-Schwellversuchen bei verschiedenen Frequenzen mit der Dehnungsreaktion infolge statischer Zugbeanspruchung verglichen. Durch die Anwendung rheologischer Modelle, deren Parameter aus Versuchen mit konstanter Zugbeanspruchung gewonnen wurden, konnte unter Berücksichtigung der aus dem Verlauf der viskoelastischen Dehnung abgeleiteten Materialschädigung der Verlauf der viskoplastischen Dehnungsanteile berechnet werden. Die gute Übereinstimmung der berechneten Dehnungsverläufe mit den in einaxialen Zug-Schwellversuchen gemessenen zeigt, dass das Versagen im Zug-Schwellversuch auf Materialermüdung zurückzuführen ist und auch der Verlauf der viskoplastischen Dehnung in dieser begründet ist.

2 Asphalteigenschaften

2.1 Zusammensetzung von Asphalt

Der Baustoff Asphalt setzt sich aus Gesteinskörnungen, die mit einem bitumenhaltigen Bindemittel verklebt sind, zusammen.

Als Gesteinskörnungen werden je nach örtlicher Verfügbarkeit gebrochenes Felsgestein oder gebrochene Kiese eingesetzt. An die Gesteinskörnungen werden hohe Qualitätsanforderungen gestellt, sodass nur ausgesuchte Gesteinsarten im Asphaltstraßenbau zur Anwendung kommen. Die bei der Herstellung nach Korngrößen getrennten Gesteinskörnungen (Fraktionen) werden im Asphaltmischwerk in gezielter Zusammensetzung wieder zusammengemischt. Durch die Zusammenstellung des Gesteinskörnungsgemisches werden die Eigenschaften des Asphaltes maßgebend mitbestimmt.

Gesteinskörnungsgemische, in denen die Fraktionen in ungefähr gleichen Mengenanteilen verwendet werden, die also nach dem Betonprinzip zusammengesetzt sind, weisen einen geringen Hohlraumgehalt auf, sodass sie zum Verkleben geringe Bindemittelmengen benötigen. Diese Asphaltmischgutarten kommen in allen Asphaltsschichten zur Anwendung und werden je nach Einsatz als Asphaltbeton (AB), Asphaltbinder- (ABi) oder Asphalttragschichtmischgut (ATS) bezeichnet. Das Tragverhalten dieser Asphalte ist nach der Verdichtung durch zahlreiche Korn-zu-Korn-Kontakte geprägt, sodass innerhalb des Asphaltes eine gute Spannungsverteilung vorherrscht.

Gesteinsmischungen mit hohen Anteilen einer einzelnen Kornfraktion, weisen im Gesteinskörnungsgemisch einen großen Hohlraumgehalt auf. Um die Einzelkörner zuverlässig miteinander zu verkleben, ist ein größerer Bindemittelgehalt notwendig. Diese als Splittmastixasphalt (SMA) und Offenporiger Asphalt (OPA) bezeichneten Asphaltmischgutsorten werden in Asphaltdeckschichten eingesetzt, wobei auch Asphaltbindervarianten nach diesem Prinzip zusammengesetzt sein können. Nach der Verdichtung wird die Belastung durch wenige Korn-zu-Korn-Kontakte abgetragen, sodass die aneinander stoßenden Kornspitzen stark beansprucht werden und somit das verwendete Gestein hohen Qualitätsansprüchen unterliegt.

Als Bindemittel kommt Bitumen zum Einsatz, das durch Destillation aus Rohöl hergestellt wird. Je nach Rohölsprung und Destillationsstufe setzt sich das Bitumen aus zahlreichen organischen Verbindungen zusammen, die seine mechanischen Eigenschaften bestimmen. Das mechanische Verhalten von Bitumen ist je nach Destillationsstufe bei tiefen Temperaturen spröde, während es bei hohen Temperaturen ein ausgeprägtes Fließverhalten aufweist. Zur Verbesserung des Gebrauchsverhaltens und zur Erweiterung des Gebrauchstemperaturbereiches können dem Bitumen verschiedenartige Polymere zugesetzt werden (polymermodifizierte Bitumen, PmB).

Das Bitumen wird dem getrockneten und erhitzten Gesteinskörnungsgemisch in einem zuvor anhand von einfachen Laborversuchen optimierten Anteil zugegeben und mit diesem vermischt. Nach dem Transport zur Einbaustelle wird das heiße Asphaltmischgut vom Straßenfertiger über die Einbaubreite verteilt und vorverdichtet. Die angestrebten mechanischen Eigenschaften werden bei Walzasphalten durch den mit Walzen durchgeführten Verdichtungs Vorgang erreicht.

Somit wird das mechanische Verhalten von Asphalt durch einer Vielzahl von Einflussfaktoren definiert, die durch die Auswahl der Baustoffkomponenten und der Bedingungen bei der Herstellung des Asphaltmischgutes und dessen Einbau sowie seiner Verdichtung geprägt sind. Durch die temperaturabhängigen Eigenschaften des Bindemittels wird das Gebrauchsverhalten der Asphaltschicht zusätzlich maßgebend von deren Temperatur und somit von Einflüssen aus Klima und Wetter bestimmt.

2.2 Aufbau von Asphaltbefestigungen

In Abbildung 2-1 ist ein exemplarischer Aufbau einer Asphaltbefestigung dargestellt, der auf hoch belasteten Straßen zur Anwendung kommt.

Aufbauend auf dem Planum – der Oberfläche des Untergrundes oder Unterbaus – wird in der Regel eine Frostschutzschicht aus ungebundenen Gesteinskörnungen angeordnet, deren Dicke von den klimatischen Bedingungen der Ortslage der Straßenbefestigung abhängt. Sie hat die Aufgabe, den Straßenkörper zu entwässern, um Schäden infolge Frosteinwirkung zu verhindern. Darüber wird die Asphalttragschicht angeordnet, die aufgrund ihrer Dicke meist in zwei Lagen

eingebaut und verdichtet wird. Asphaltmischgut für Asphalttragschichten besteht in der Regel aus unmodifizierten Straßenbaubitumen und einem abgestuften Gesteinskörnungsgemisch mit einem Größtkorndurchmesser von 22 mm oder 32 mm. Darüber befindet sich die Asphaltbinderschicht, die aus kornabgestuftem Asphaltmischgut mit einem Größtkorn von 16 mm oder 22 mm zusammengesetzt ist. Die die Oberfläche der Straße bildende Asphaltdeckschicht wird im Regelfall in einer Dicke von 4 cm eingebaut und muss höchste Qualitätsanforderungen an Ebenheit und Griffigkeit erfüllen. Daher kommt meist ein Walzasphalt mit einem Größtkorn von 8 mm oder 11 mm zur Anwendung. Da diese Schicht den größten wetterbedingten Temperaturbereichen ausgesetzt ist, kommen vermehrt polymermodifizierte Bindemittel zum Einsatz, die die Gebrauchstauglichkeit sowohl bei sehr warmen als auch bei sehr kalten Temperaturen gewährleisten müssen.

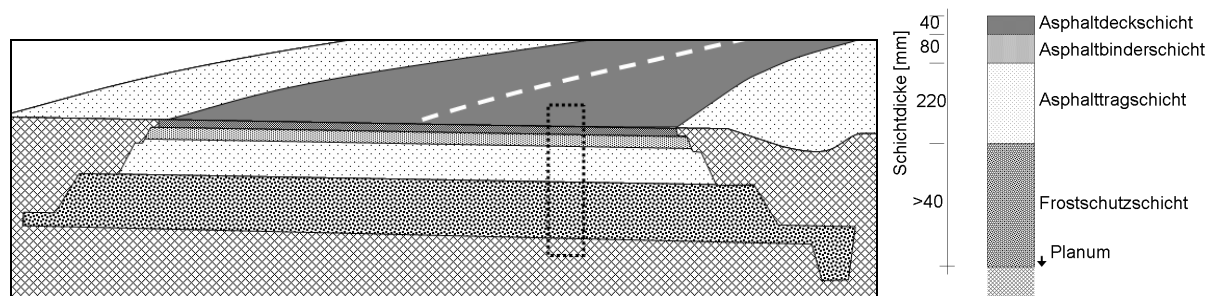


Abbildung 2-1: Exemplarischer Aufbau einer Asphaltbefestigung für hochbeanspruchte Straßen gemäß RStO [14]

2.3 Beanspruchung von Asphaltbefestigungen

Die Asphaltbefestigung wird durch den darüber fahrenden Verkehr belastet. In Abhängigkeit von den Steifigkeiten des Untergrundes und der ungebundenen Tragschichten reagiert das Asphaltpaket mit einer Durchbiegung unter den Lasteinleitungspunkten – den Rädern. Die Biegung erzeugt insbesondere horizontal wirkende Biegespannungen, die bei konkaver Krümmung direkt unter der Lasteinleitungsfläche an der Unterseite des Asphaltpaketes und neben der Lasteinleitungsfläche an der Oberseite des Asphaltpaketes als Zugspannung auftreten. Bei einer rollenden Last bewegt sich die Durchbiegung mit dem belasteten Fahrzeug mit, sodass ein einzelner Punkt der Befestigung durch eine annähernd sinusförmige Belastungsfunktion beansprucht wird. Die auftretenden Dehnungen an der Unterseite des Asphaltpaketes konnten durch die Ausrüstung einer Versuchsstraße mit

Wegmesseinrichtungen gemessen werden [39] (vgl. Abbildung 2-2). Die Zugspannung infolge Biegebeanspruchung durch den Verkehr wird auch als mechanogene Spannung bezeichnet.

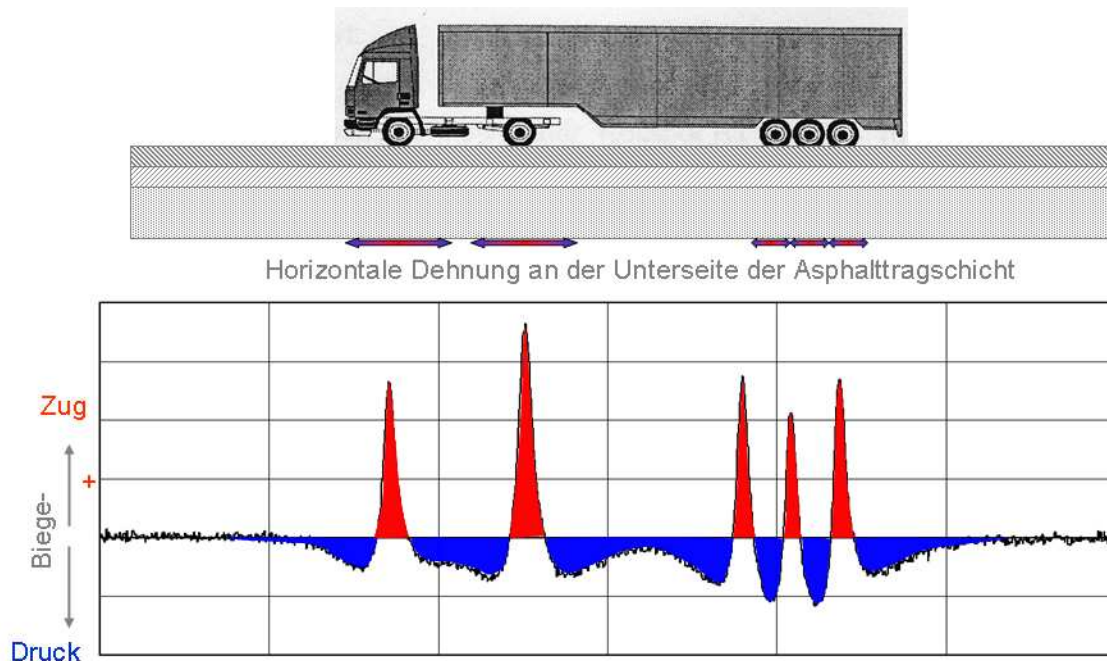


Abbildung 2-2: Mechanogene Spannungen in einer Asphaltbefestigung [39]

Zusätzlich unterliegen Asphaltbefestigungen einer weiteren, vom Verkehr unabhängigen Beanspruchung. Aufgrund der temperaturabhängigen Eigenschaften des Baustoffs nimmt die Viskosität des Asphaltes mit sinkender Temperatur zu. Dies reduziert das Relaxationsvermögen des Baustoffes, sodass wirkende Spannungen bei Kälte nur sehr langsam durch interne Fließbewegungen abgebaut werden können. Bei Abkühlung bauen sich infolge be- und verhinderter thermischer Dehnung sogenannte kryogene Spannungen auf. Wegen seiner hohen Viskosität kann der Asphalt nur sehr langsam relaxieren, sodass diese Spannungen lange anhalten. Somit erfährt das Asphaltpaket bei absinkenden Temperaturen infolge von Wetterereignissen vor allem an seiner Oberseite Zugspannungen, die bei Befahrung gleichzeitig mit den mechanogenen Spannungen wirken [4,37].

Bei tiefen Temperaturen wird der Asphalt somit von zwei Spannungskomponenten beansprucht, die in ihrer Kombination zu Ermüdungsschäden führen können (vgl. Abbildung 2.3). Bei der Dimensionierung von Asphaltbefestigungen müssen die vorherrschenden Beanspruchungszustände berücksichtigt werden. Für die Berechnung der Beanspruchungen infolge Verkehrs und Wetters sowie zur

Simulation der Reaktion des Baustoffes auf diese Beanspruchung können Berechnungsmodelle erstellt werden. Die Materialmodelle der einzelnen Asphaltbaustoffe sowie der ungebundenen Schichten und des anstehenden Untergrundes kommen kombiniert zur Simulation der Straßenbefestigung zur Anwendung [38]. Lorenzl konnte in [3,25] durch die Berücksichtigung der tatsächlichen Beanspruchungen aus Verkehr (Auswertung von Verkehrszählungen) und des Wetters (Lufttemperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit) den beobachteten Zeitpunkt der Rissentstehung von 7 hessischen Asphaltbefestigungen berechnen.

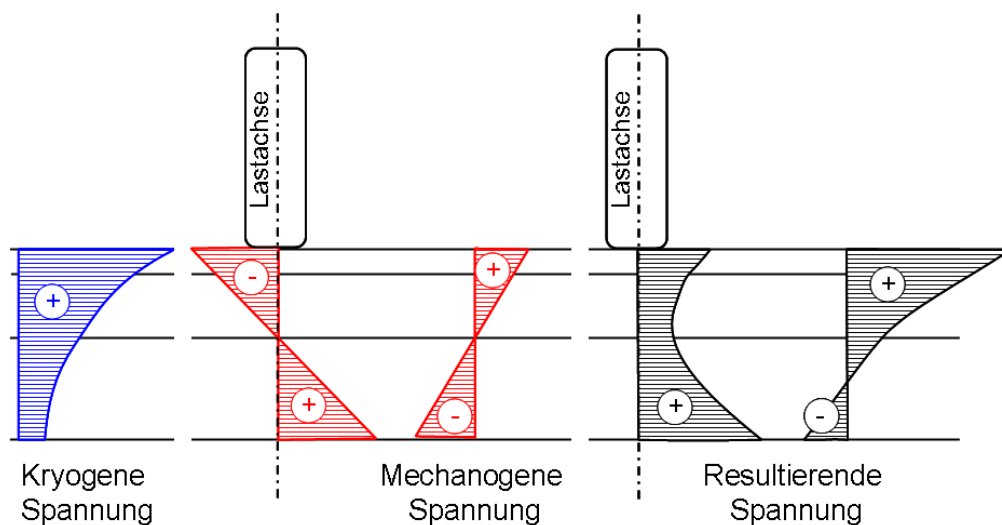


Abbildung 2-3: Superposition von kryogenen und mechanogenen Spannungen (schematisch) [3,25]

Die Kombination des Gesteinskörnungsgemisches und des aus zahlreichen organischen Verbindungen bestehenden Bindemittels, dessen Zusammensetzung je nach Ursprung des Rohöls, Raffinierung und zugegebenen Additiven variiert, ergeben das überaus komplexe mechanische Verhalten des Asphaltes. Daher sind Modelle in der Entwicklung, die zunächst die mechanischen Eigenschaften der Einzelkomponenten beschreiben, um in deren Kombination das Asphaltverhalten simulieren zu können (z.B. [7]). Da diese Berechnungsverfahren noch nicht zur Verfügung stehen, wird zur Simulation des Stoffverhaltens meist auf rheologische Modelle zurückgegriffen, die das mechanische Verhalten von Asphalt als homogenem Baustoff beschreiben.

2.4 Rheologie von Asphalt

2.4.1 Rheologische Modelle zur Simulation des Verformungsverhaltens

Die Rheologie dient als Teilgebiet der Mechanik der mathematischen Beschreibung der Verformungsvorgänge von Stoffen infolge äußerer Lasten. Durch die Kombination einfacher Modelle, die rein elastisches, plastisches oder viskoses Verhalten aufweisen, kann das tatsächliche Verformungsverhalten realer Stoffe unter Last und Zwang mit guter Annäherung unter Zugrundelegung physikalischer Gesetzmäßigkeiten beschrieben werden.

Werden rheologische Einzelelemente in Reihe geschaltet, wirkt in diesen Elementen die gleiche Spannung, während die Gesamtdehnung gleich der Summe der Dehnung aller Einzelelemente ist.

Parallel geschaltete Einzelelemente erfahren die gleichen Dehnungen, während die das Gesamtmodell belastende Spannung die Summe der in den Einzelelementen wirkenden Spannungen ist.

Im Folgenden werden zunächst rheologische Einzelelemente vorgestellt, sowie ihre Zusammenschaltung in verschiedenen Modellen. Die darauffolgenden Kapitel diskutieren die Reaktionen dieser Modelle auf verschiedene Belastungssituationen.

2.4.1.1 Elastizität

Die Elastizität, in Prinzipskizzen angedeutet als Federelement, beschreibt die Fähigkeit eines Körpers, eine durch eine äußere Last aufgezwungene Dehnung nach Wegnahme der Last wieder vollständig und spontan zurück zu bilden. Die Dehnung eines rein elastischen Körpers ist proportional zur wirkenden Spannung. Die Größe der Dehnung wird durch den Elastizitätsmodul (kurz: E-Modul) definiert. Gleichung 2.1 gibt die Dehnungsänderung $\dot{\epsilon}$ eines rein elastischen Körpers infolge einer aufgezwungenen Spannungsänderung $\dot{\sigma}$ wieder.

$$\dot{\epsilon}_{\text{el}} = \frac{\dot{\sigma}}{E} \quad \text{Gleichung 2.1}$$

2.4.1.2 Viskosität

Die Viskosität, dargestellt als Dämpfer-Element, beschreibt die Fließfähigkeit eines Materials infolge äußerer Belastung. Die Dehnung eines rein viskosen Materials ist

proportional zum Produkt aus Last und Zeit. Die Steigung des Dehnungsverlaufs infolge einer Zugbeanspruchung wird durch die (Zug-)Viskosität λ definiert. Mit Gleichung 2.2 wird die Dehnungszunahme $\dot{\epsilon}$ infolge einer Spannung σ berechnet.

$$\dot{\epsilon}_{\text{vis}} = \frac{\sigma}{\lambda} \quad \text{Gleichung 2.2}$$

2.4.1.3 Plastizität

Die Plastizität kann als St.-Venant'sches Reibelement dargestellt werden. Bei Überschreiten einer Zustandsgrenze (Spannung) lässt die Plastizität eine Verformung zu, deren Art und Verlauf ϵ_i näher beschrieben werden muss, aber sich nicht selbstständig zurückbildet (Gleichung 2.3). Durch eine ergänzte Funktion kann der Verlauf der plastischen Dehnung ϵ_i näher beschrieben werden. So wird die Bezeichnung *viskoplastisch* oftmals benutzt, um rein viskoses Materialverhalten zu beschreiben, und betont das Fehlen der selbstständigen Rückformung nach Entfernen der Last. Die Verformung von ungebundenen Kornhaufwerken wird häufig durch *hypoplastisches* Verhalten beschrieben.

$$\dot{\epsilon}_{\text{plast}} = \begin{cases} 0 & \text{für } \sigma < \sigma_{\text{Grenz}} \\ \epsilon_i & \text{für } \sigma > \sigma_{\text{Grenz}} \end{cases} \quad \text{Gleichung 2.3}$$

2.4.1.4 Maxwell-Modell

Das Maxwell-Modell wird durch die Reihenschaltung eines Federelementes und eines Dämpferelementes gebildet. Da durch die Reihenschaltung in beiden Einzelementen die gleiche Spannung σ wirkt, ergibt sich die Gesamtdehnungsänderung $\dot{\epsilon}_{\text{Maxwell}}$ aus der Summe der Dehnungsänderung beider Einzelemente (Gleichung 2.4).

$$\dot{\epsilon}_{\text{Maxwell}} = \dot{\epsilon}_{\text{el}} + \dot{\epsilon}_{\text{vis}} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\lambda} \quad \text{Gleichung 2.4}$$

2.4.1.5 Voigt-Kelvin-Modell

Das Voigt-Kelvin-Modell wird durch die Parallelschaltung eines Federelementes mit einem Dämpferelement gebildet. Durch die Parallelschaltung erfahren beide Einzelemente die gleiche Dehnung, während sich die Gesamtspannung aus der Summe der in beiden Elementen wirkenden Einzelspannungen ergibt (Gleichung 2.5).

$$\sigma_{\text{Voigt-Kelvin}} = \sigma_{\text{el}} + \sigma_{\text{vis}} = E \cdot \varepsilon + \lambda \cdot \dot{\varepsilon} \quad \text{Gleichung 2.5}$$

2.4.1.6 Burgers-Modell

Das Burgers-Modell wird durch die Reihenschaltung eines Maxwell-Modells mit einem Voigt-Kelvin-Modell zusammengesetzt. Die Gesamtdehnungsänderung $\dot{\varepsilon}_{\text{Burgers}}$ ergibt sich aus der Summe der in Reihe geschalteten Einzeldehnungsänderungen.

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{\text{Burgers}} &= \dot{\varepsilon}_{\text{el}} + \dot{\varepsilon}_{\text{vis}} + \dot{\varepsilon}_{\text{Voigt-Kelvin}} \\ &= \frac{\dot{\sigma}}{E_1} + \frac{\sigma}{\lambda_1} + \left(\frac{\sigma}{\lambda_2} - \frac{E_2}{\lambda_2} \cdot \varepsilon_{\text{Voigt-Kelvin}} \right) \end{aligned} \quad \text{Gleichung 2.6}$$

2.4.2 Reaktion rheologischer Modelle bei konstanter Spannung

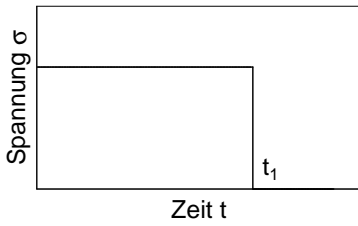

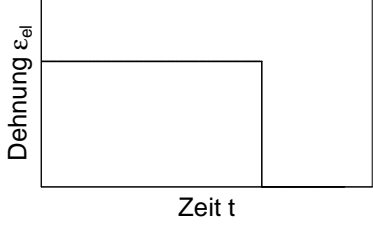

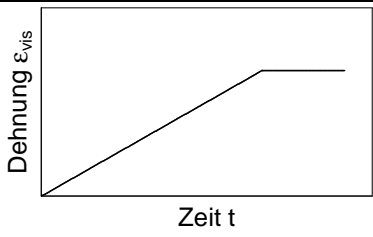
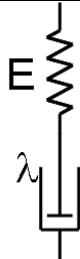
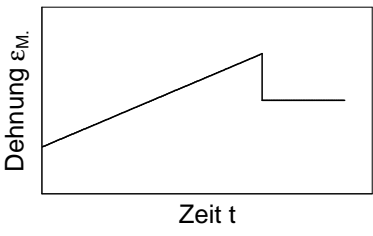
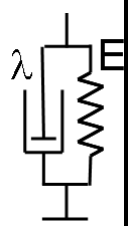
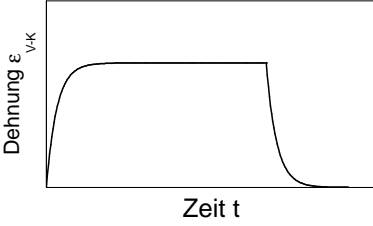
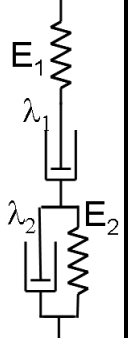
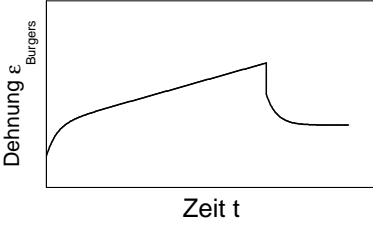
In Kriechversuchen wird ein Probekörper bis zu einem bestimmten Zeitpunkt t_1 mit einer konstanten Spannung belastet. Die Spannungsfunktion in Abhängigkeit von der Zeit ist durch Gleichung 2.7 vorgegeben.

$$\sigma(t) = \sigma_{\text{konst}} \quad \text{Gleichung 2.7}$$

Die Reaktionen der rheologischen Einzelemente und der komplexeren Modelle sind durch die Differentialgleichungen (Gln. 2.1 bis 2.6) definiert. Die sich ergebenden konkreten Lösungen der Differentialgleichung und die qualitativen Dehnungsverläufe der verschiedenen Elemente sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Bei dem am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig angewendeten Zug-Kriechversuch, der auch als Retardationsversuch bezeichnet wird, wird nach der Belastungsphase die Zugkraft auf null zurückgesetzt. Die sich zurückstellende Verformung wird über die Zeit beobachtet. In den Diagrammen in Tabelle 2.1 sind die Formen des Rückstellvorgangs qualitativ ergänzt.

Tabelle 2.1: Reaktionen verschiedener rheologischer Modelle bei konstanter Spannung

Modell	Symbol	Qualitativer Verlauf	Funktion für $t < t_1$:
		 <p>Spannung σ</p> <p>Zeit t</p> <p>t_1</p>	$\sigma(t) = \sigma_{\text{konst.}}$
Elastizität	 <p>E</p>	 <p>Dehnung ϵ_{el}</p> <p>Zeit t</p>	$\epsilon_{\text{el}}(t) = \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{E}$
Viskosität	 <p>λ</p>	 <p>Dehnung ϵ_{vis}</p> <p>Zeit t</p>	$\epsilon_{\text{vis}}(t) = t \cdot \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{\lambda}$
Maxwell-Modell	 <p>E</p> <p>λ</p>	 <p>Dehnung $\epsilon_{\text{M.}}$</p> <p>Zeit t</p>	$\epsilon_{\text{Maxwell}}(t) = \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{E} + t \cdot \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{\lambda}$
Voigt-Kelvin-Modell	 <p>λ</p> <p>E</p>	 <p>Dehnung $\epsilon_{\text{V.K.}}$</p> <p>Zeit t</p>	$\epsilon_{\text{V.-K.}}(t) = \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{E} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E}{\lambda} t} \right)$
Burgers-Modell	 <p>E_1</p> <p>λ_1</p> <p>λ_2</p> <p>E_2</p>	 <p>Dehnung $\epsilon_{\text{Burgers}}$</p> <p>Zeit t</p>	$\epsilon_{\text{Burgers}}(t) = \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{E_1} + t \cdot \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{\lambda_1} + \frac{\sigma_{\text{konst.}}}{E_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\lambda_2} t} \right)$

2.4.3 Reaktion rheologischer Modelle bei sinusförmiger Schwellbelastung

In Schwellversuchen wird ein Probekörper durch die Überlagerung einer konstanten Spannung σ_m mit einer sinusförmig schwingenden Spannung der Amplitude σ_a und der Frequenz f belastet. Die Spannungsfunktion wird durch Gleichung 2.8 definiert. Die Frequenz f bestimmt die Kreisfrequenz ω (vgl. Gleichung 2.9).

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad \text{Gleichung 2.8}$$

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \text{Gleichung 2.9}$$

Die Dehnungsreaktionen der einzelnen rheologischen Elemente werden durch die Differentialgleichungen 2.1 bis 2.6 definiert und können inkrementell berechnet werden. Die konkrete Beschreibung der Dehnungsreaktion der in Reihe geschalteten Einzelelemente des Burgers-Modells erfordert das Lösen der verschiedenen Differentialgleichungen, die von der Art der Spannungsfunktion bestimmt werden.

2.4.3.1 Kenngrößen

Die Anwendung einer sinusförmigen Beanspruchung bei der Materialprüfung ermöglicht die Ermittlung weiterer Stoffkenngrößen, die zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften verwendet werden.

Werden elastische Stoffe durch eine sinusförmige Spannung beansprucht, reagieren sie mit einer sinusförmigen Dehnung. Die Maxima beider Sinusfunktionen treten zum selben Zeitpunkt auf. Der E-Modul entspricht dem Quotienten aus der Amplitude der Spannungs-Sinusschwingung σ_a und der Amplitude der Dehnungs-Sinusschwingung ε_a .

Die viskosen Eigenschaften viskoelastischer Materialien bewirken eine Dämpfung der Dehnungsreaktion. Bei kontinuierlicher Beanspruchung durch eine sinusförmige Spannungsschwingung bewirkt die Dämpfung eine Phasenverschiebung der beiden Schwingungen. Die Dehnungsreaktion erfolgt gegenüber der Spannungsschwingung zeitverzögert. Diese Verzögerung wird durch den Phasenwinkel φ ausgedrückt. Bei viskoelastischen Stoffen wird der Quotient aus der Amplitude der Spannungs-Sinusschwingung σ_a und der Amplitude der Dehnungs-Sinusschwingung ε_a als absoluter E-Modul $|E|$ bezeichnet. Phasenwinkel und absoluter E-Modul in Kombination bilden den komplexen E-Modul E^* .

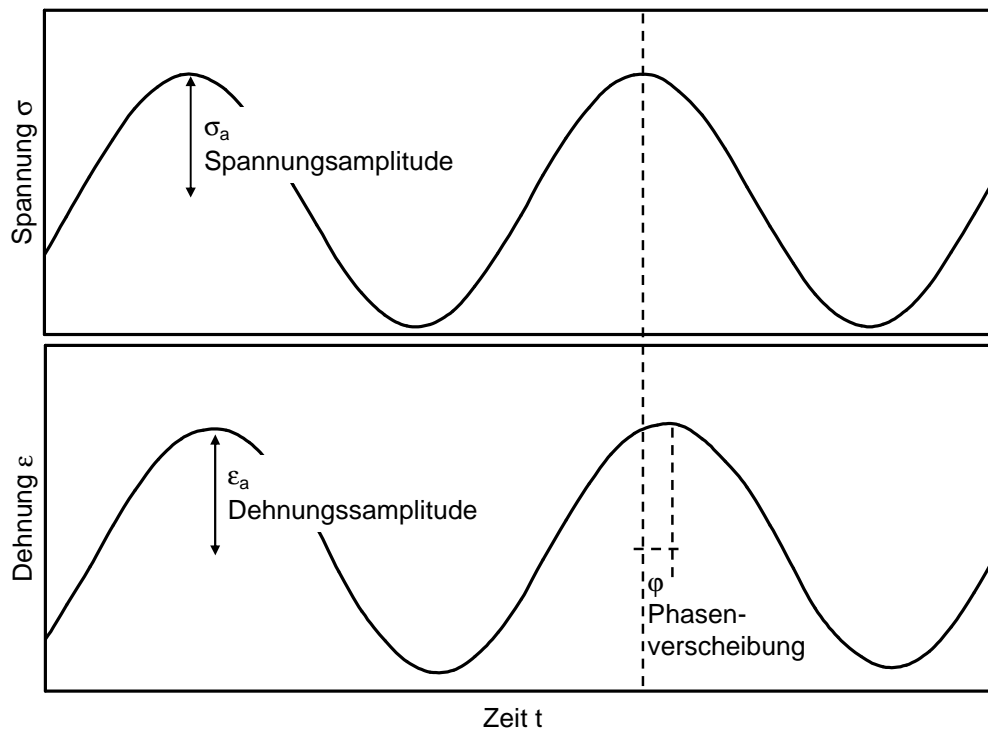


Abbildung 2-4 Spannungs-Dehnungsfunktion viskoelastischer Stoffe bei sinusförmiger Schwell-Beanspruchung

2.4.3.2 Dehnungsfunktion eines Federelementes

Die Dehnungsreaktion der Feder folgt der Spannungsfunktion ohne Phasenverschiebung und kann durch Gleichung 2.10 beschrieben werden.

$$\varepsilon_{\text{Feder}}(t) = \frac{\sigma_m}{E} + \frac{\sigma_a}{E} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \text{Gleichung 2.10}$$

2.4.3.3 Dehnungsfunktion eines Dämpferelementes

Da das Spannungssignal einer Zug-Schwellbeanspruchung keinen Null-Durchgang aufweist, und die Spannung unterschiedliche Werte mit gleichem Vorzeichen annimmt, zeigt sich das Dehnungssignal des einfachen Dämpfers als ständig ansteigende Welle, die durch Gleichung 2.11 definiert ist.

$$\varepsilon_{\text{Dämpfer}}(t) = \frac{\sigma_m}{\lambda} \cdot t + \frac{\sigma_a}{\lambda \cdot \omega} \cdot (1 - \cos \omega \cdot t) \quad \text{Gleichung 2.11}$$

Der Dehnungszuwachs je Lastimpuls ist konstant. Der Phasenwinkel zwischen dem Dehnungssignal des Dämpfers und dem Spannungssignal beträgt 90°. Aus dem Dehnungsverlauf des Dämpfers ergibt sich ein absoluter E-Modul nach Gleichung 2.12.

$$|E|_{\text{Dämpfer}} = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} = \frac{\sigma_a}{\frac{\sigma_a}{\lambda \cdot \omega}} = \lambda \cdot \omega = \lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad \text{Gleichung 2.12}$$

2.4.3.4 Dehnungsfunktion eines Maxwell-Modells

Die Dehnungsreaktion des Maxwell-Modells ergibt sich aus der Addition der Dehnungsanteile einer Feder und eines Dämpfers in Reihenschaltung.

Die Addition zweier Schwingungen mit unterschiedlichen konstanten Anteilen (A,a), Amplituden (B,b) und Phasenverschiebungen (C,c) (vgl. Gl. 2.13 und Gl. 2.14) erfolgt gemäß Gleichung 2.15:

$$f(t) = A + B \cdot \sin(t + C) \quad \text{Gleichung 2.13}$$

$$g(t) = a + b \cdot \sin(t + c) \quad \text{Gleichung 2.14}$$

$$\begin{aligned} f(t) + g(t) &= A + B \cdot \sin(t + C) + a + b \cdot \sin(t + c) \\ &= A + a + \sqrt{B^2 + b^2 + 2 \cdot B \cdot b \cdot \cos(C - c)} \cdot \sin\left(t + \arccos \frac{B \cdot \cos C + b \cdot \cos c}{\sqrt{B^2 + b^2 + 2 \cdot B \cdot b \cdot \cos(C - c)}}\right) \end{aligned} \quad \text{Gleichung 2.15}$$

Die Überlagerung der phasenverschobenen Schwingungsamplituden des Feder- und des Dämpferelementes ergibt die Dehnungsfunktion gemäß Gleichung 2.16, die somit die Reaktion eines Maxwell-Modells beschreibt.

$$\varepsilon_{\text{Maxwell}}(t) = \frac{\sigma_m}{E} + \frac{\sigma_m}{\lambda} \cdot t + \sigma_a \sqrt{\frac{1}{E^2} + \frac{1}{(\lambda \cdot \omega)^2}} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \arccos \frac{1}{E \cdot \sqrt{\frac{1}{E^2} + \frac{1}{(\lambda \cdot \omega)^2}}}\right) \quad \text{Gleichung 2.16}$$

Wird die Relaxationszeit $t_R = \lambda/E$ in Gleichung 2.16 verwendet, ergeben sich der absolute E-Modul und der Phasenwinkel eines sinusförmig belasteten Maxwell-Modells zu:

$$|E|_{\text{Maxwell}} = \frac{E}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{t_R \cdot \omega}\right)^2}}; \quad \varphi = \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(t_R \cdot \omega)^2}}} \quad \text{Gleichung 2.17}$$

Die Abbildung 2-5 zeigt die Abhängigkeit des absoluten E-Moduls und des Phasenwinkels des Maxwell-Modells von der Frequenz f und der Relaxationszeit t_R . Je höher die Frequenz f ist, mit der das Maxwell-Modell belastet wird, desto größer wird der absolute E-Modul und desto kleiner wird der Phasenwinkel φ der resultierenden Dehnung. Weiterhin führt eine große Relaxationszeit - also ein im Vergleich zur Federsteifigkeit hoher Viskositätsbetrag - zu einer Zunahme des resultierenden absoluten E-Moduls und einer Abnahme des Phasenwinkels.

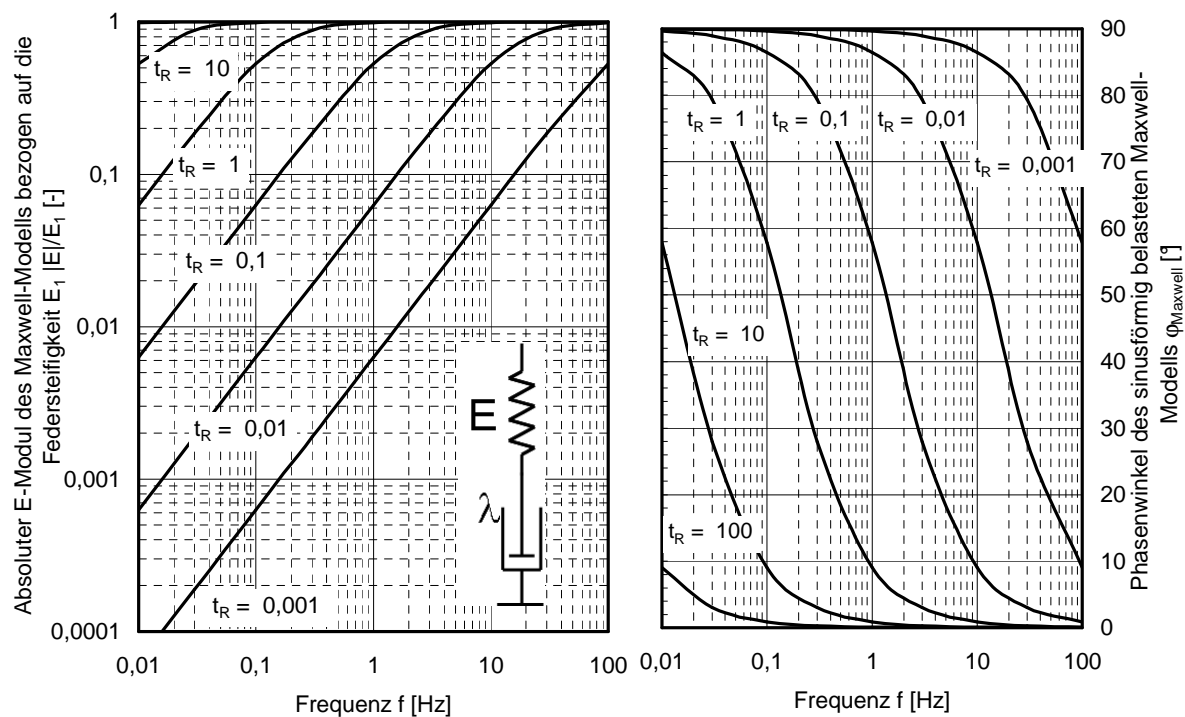


Abbildung 2-5: Absoluter E-Modul und Phasenwinkel eines sinusförmig belasteten Maxwell-Modells in Abhängigkeit von der Frequenz f und der Relaxationszeit t_R

2.4.3.5 Dehnungsfunktion des Voigt-Kelvin-Körpers

Der Dehnungsverlauf des Voigt-Kelvin-Körpers kann durch Gleichung 2.13 konkret beschrieben werden.

$$\varepsilon_{\text{Voigt-Kelvin}}(t) = \frac{\sigma_m}{E} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E}{\lambda} \cdot t} \right) + \sigma_A \cdot \frac{\omega \cdot \lambda}{E^2 + \omega^2 \cdot \lambda^2} \cdot e^{-\frac{E}{\lambda} \cdot t} + \sigma_A \cdot \frac{1}{\sqrt{E^2 + \omega^2 \cdot \lambda^2}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

Gleichung 2.18

Die Dehnung steigt bei Versuchsbeginn zunächst mit der Dehnungsrate $\dot{\varepsilon}(t=0) = \frac{\sigma_m}{\lambda}$ an, die im Verlauf der Belastung abnimmt und sich asymptotisch einer Grenzdehnung $\varepsilon(t=\infty) = \frac{\sigma_m}{E}$ nähert, um deren Wert sie sinusförmig mit der Amplitude ε_A schwingt.

Die Phasenverschiebung φ , mit der das Dehnungssignal dem Spannungssignal folgt, ist abhängig von Elastizitätsmodul und Viskosität des Voigt-Kelvin-Modells sowie von der Kreisfrequenz ω der Belastungsfunktion und kann mit Gleichung 2.19 beschrieben werden.

$$\varphi = \arccos\left(\frac{E}{\sqrt{E^2 + \omega^2 \cdot \lambda^2}}\right) = \arcsin\left(\frac{-\omega \cdot \lambda}{\sqrt{E^2 + \omega^2 \cdot \lambda^2}}\right)$$

Gleichung 2.19

Der aus dem Dehnungsverlauf resultierende absolute E-Modul $|E|$ wird durch Gleichung 2.20 beschrieben.

$$|E|_{\text{Voigt-Kelvin}} = \frac{\sigma_A}{\varepsilon_A} = \frac{\sigma_A}{\frac{\sigma_A}{\sqrt{E^2 + \omega^2 \cdot \lambda^2}}} = \sqrt{E^2 + \omega^2 \cdot \lambda^2}$$

Gleichung 2.20

Wird der Quotient aus Viskosität und Elastizitätsmodul durch die Relaxationszeit $t_R = \lambda/E$ ersetzt, so ergeben sich die Gleichungen 2.21 und 2.22.

$$|E|_{\text{Voigt-Kelvin}} = E \cdot \sqrt{1 + \omega^2 \cdot t_R^2}$$

Gleichung 2.21

$$\varphi = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot t_R^2}}\right)$$

Gleichung 2.22

Die Abbildung 2-6 zeigt die Abhängigkeit des absoluten E-Moduls und des Phasenwinkels des Voigt-Kelvin-Modells von der Frequenz f und der Relaxationszeit t_R . Je höher die Frequenz f ist, mit der das Voigt-Kelvin-Modell belastet wird, desto größer wird der absolute E-Modul und desto größer wird der Phasenwinkel φ der resultierenden Dehnung. Weiterhin führt eine große Relaxationszeit - also ein im Vergleich zur Federsteifigkeit hoher Viskositätsbetrag - zu einer Abnahme des resultierenden absoluten E-Moduls und einer Zunahme des Phasenwinkels.

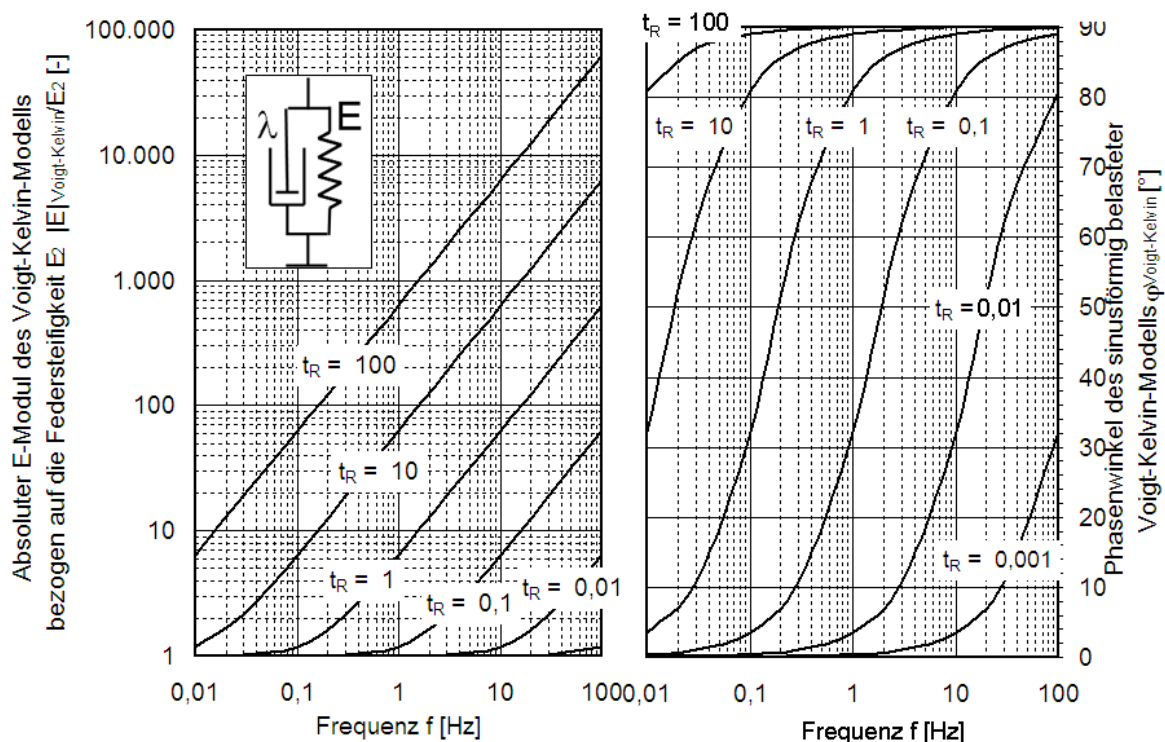


Abbildung 2-6: Absoluter E-Modul und Phasenwinkel eines sinusförmig belasteten Voigt-Kelvin-Modells in Abhängigkeit von der Frequenz f und der Relaxationszeit t_R

2.4.3.6 Dehnungsfunktion des Burgers-Modells

Die Dehnungsfunktion des Burgers-Modells ergibt sich als Summe der Dehnungsfunktionen der in Reihe geschalteten Einzelmodelle. Die Dehnungsverläufe infolge einer durch die mittlere Spannung σ_m , die Spannungsamplitude σ_A und die Frequenz f definierten sinusförmigen Schwell-Spannung der einzelnen rheologischen Einzelelemente sowie des Burgers-Modells sind in Abbildung 2-7 zusammengestellt.

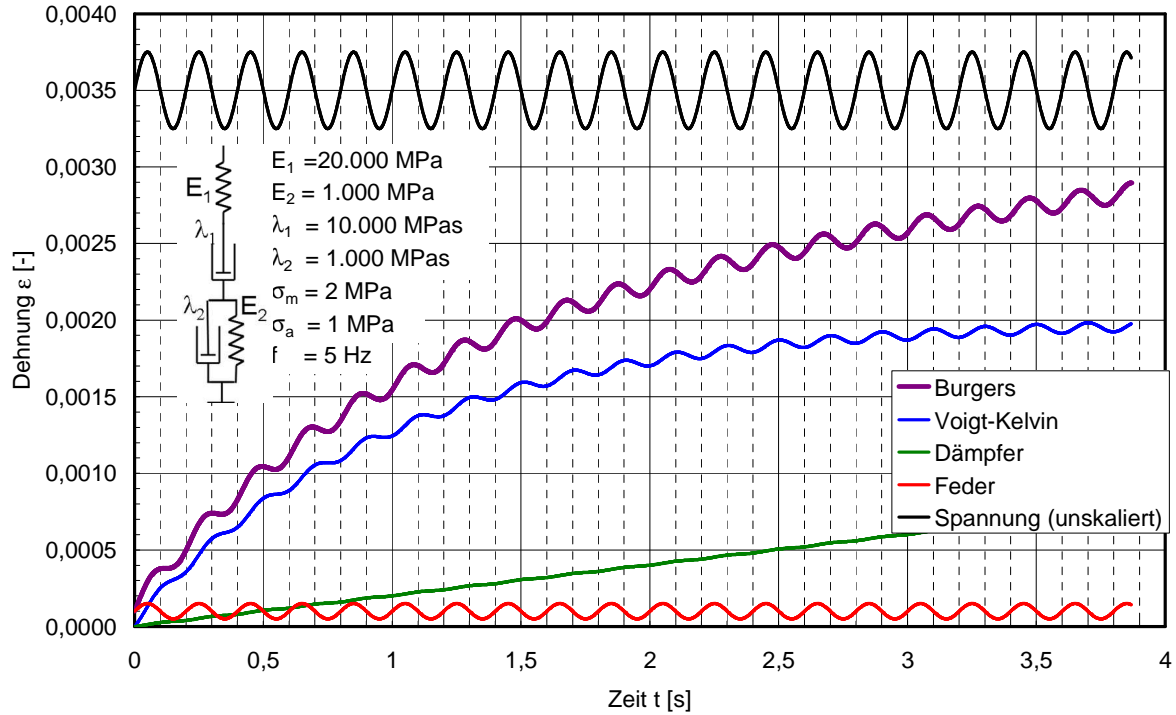


Abbildung 2-7: Berechnete Dehnung und Dehnungsanteile der Einzelemente des Burgers-Modells infolge einer sinusförmigen Schwellspannung

Der absolute E-Modul und der Phasenwinkel des Burgers-Modells können durch Superposition der einzelnen Dehnungsreaktionen der Einzelmodelle (vgl. Gl. 2.15) berechnet werden.

Die Überlagerung der Dehnungsfunktion des Maxwell-Modells mit der des Voigt-Kelvin-Modells führt zu der Dehnungsamplitude und dem Phasenwinkel des Burgers-Modells gemäß Gleichungen 2.23 bis 2.25.

$$\varepsilon_{\text{Burgers}}(t) = \frac{\sigma_m}{E} + \frac{\sigma_m}{\lambda} \cdot t + \frac{\sigma_m}{E} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E}{\lambda}t}\right) + \sigma_a \cdot \frac{\omega \cdot \lambda}{E^2 + \omega^2 \cdot \lambda^2} \cdot e^{-\frac{E}{\lambda}t} + \varepsilon_{a,\text{Burgers}} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \varphi_{\text{Burgers}}\right)$$

Gleichung 2.23

$$\varepsilon_{a,\text{Burgers}} = \sigma_a \sqrt{\frac{1}{E_1^2} + \frac{1}{(\lambda_1 \cdot \omega)^2} + \frac{1}{E_2^2 + \omega^2 \cdot \lambda_2^2} + 2 \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{E_1^2} + \frac{1}{(\lambda_1 \cdot \omega)^2}}}{\sqrt{E_2^2 + \omega^2 \cdot \lambda_2^2}} \cdot \cos\left(\arccos\left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{E_1^2}{(\lambda_1 \cdot \omega)^2}}}\right) - \arccos\left(\frac{E_2}{\sqrt{E_2^2 + \omega^2 \cdot \lambda_2^2}}\right)\right)}$$

Gleichung 2.24

$$\varphi_{\text{Burgers}} = \arccos \left(\frac{\sigma_a \cdot \left(\frac{1}{E_1} + \frac{E_2}{E_2^2 + (\omega \cdot \lambda_2)^2} \right)}{\varepsilon_{a,\text{Burgers}}} \right) \quad \text{Gleichung 2.25}$$

Somit können bei Kenntnis der Kennwerte der rheologischen Elemente des Burgers-Modells der resultierende absolute E-Modul und der Phasenwinkel bei Beanspruchung durch eine schwellende Sinusschwingung berechnet werden.

2.4.4 Vereinfachende Nomenklatur

In kraftgeregelten Prüfungen an Asphalt, in denen die Spannung als Beanspruchung vorgegeben wird, wird die gemessene Dehnungsreaktion zur Interpretation benutzt. Die verschiedenen Dehnungsanteile, die in dynamischen Prüfungen beobachtet werden können, werden mitunter mit vereinfachenden Begriffen belegt. So werden unter dem Begriff „elastische“ Dehnung / Verformung meist elastische und viskoelastische Dehnungsanteile zusammengefasst. Der in einer Prüfung, bei der ein Spannungssignal ohne Vorzeichenwechsel vorgegeben wird, zu beobachtende Dehnungsverlauf, der anwachsende viskose und viskoelastische Dehnungsanteile enthält, wird auch als Verlauf der akkumulierten bleibenden Dehnung $\varepsilon_{\text{akk, bl}}$ oder als Impulskriechkurve bezeichnet.

2.4.5 Temperatur-Frequenz-Äquivalenz des Elastizitätsmoduls

Das Materialverhalten von Asphalt ist im hohen Maße abhängig von der Temperatur. Durch die viskosen und viskoelastischen Eigenschaften des Asphaltes ergibt sich für die Dehnungsreaktion zusätzlich eine starke Abhängigkeit von der Belastungszeit und – bei sinusförmiger Beanspruchung – von der Frequenz f .

Vereinfachend kann die Annahme getroffen werden, dass für den absoluten E-Modul eine Temperatur-Frequenz-Äquivalenz besteht. Danach wird der absolute E-Modul, der in einer dynamischen Prüfung für die Temperatur T_1 und der Frequenz f_1 ermittelt wurde, bei einer anderen Prüftemperatur T_2 bei einer Frequenz von f_2 erreicht. Somit können absolute E-Moduln, die bei verschiedenen Prüftemperaturen ermittelt wurden, auf eine Referenztemperatur T_R bezogen werden. Der für die Verschiebung der Messwerte benötigte Parameter zur Berechnung der korrigierten Frequenz f_{kor} wird als Verschiebungsfaktor α_T bezeichnet (Gleichung 2.26). Nach Hürtgen [20]

eignet sich für die Ermittlung des temperaturabhängigen Verschiebungsfaktors die physikalisch begründete Arrhenius-Funktion (Gleichung 2.27).

$$f_{\text{kor}} = f \cdot \alpha_T \quad \text{Gleichung 2.26}$$

$$\alpha_T = \frac{1}{e^{-m \cdot \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{T_R+273} \right)}} \quad \text{Gleichung 2.27}$$

mit: T: tatsächliche Prüftemperatur [°C]
 T_R: Bezugstemperatur [°C]
 m: Faktor [°C] (m ≈ 25.000 °C [20])

In Abbildung 2-8 wird das Prinzip der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz verdeutlicht. Durch die horizontale Verschiebung der absoluten E-Moduln um den temperaturabhängigen Faktor α_T bilden die bei verschiedenen Temperaturen ermittelten E-Moduln eine gemeinsame Master-Kurve.

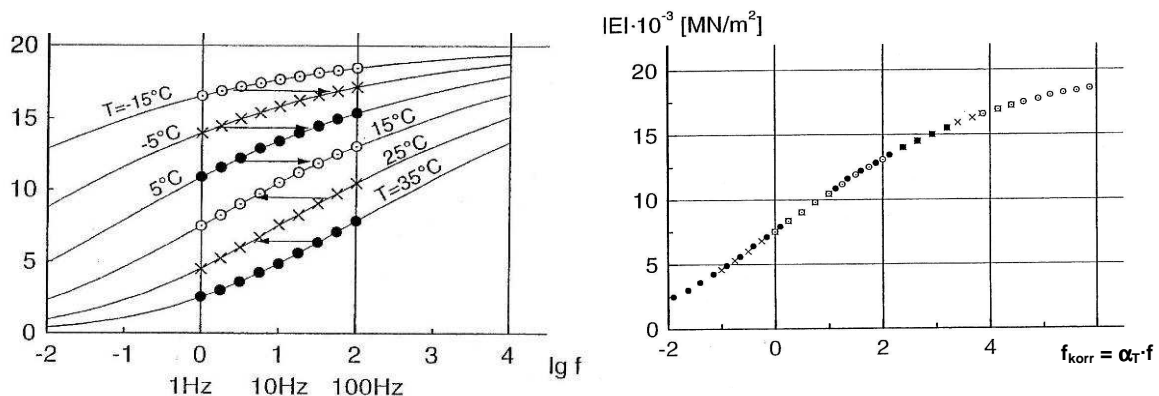


Abbildung 2-8: Anwendung der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz zur Ermittlung einer Masterkurve für die Beschreibung des frequenzabhängigen absoluten E-Moduls bei einer Referenztemperatur T_R [20]

2.5 Ermüdungsverhalten von Asphalt

In [21] wird das Werkstoffversagen unter wechselnder bzw. schwingender Beanspruchung, die im Betrag weit unterhalb der statischen Festigkeit oder der Dehngrenze liegt, als Materialermüdung definiert. Die durch Ermüdung im beanspruchten Material erzeugten mikroskopischen Veränderungen und Schäden können makroskopisch zu Entfestigungen und schließlich zur Rissbildung führen. Dadurch bewirkt die Ermüdung die Abnahme des Widerstandes, den ein Material einer lang andauernden

oder häufig wiederholten Beanspruchung entgegensetzen kann. Diese äußert sich für den äußeren Betrachter in einer Reduzierung der Steifigkeit, die als Abnahme der Komponenten Elastizität und Viskosität interpretiert werden kann. Bei konstant gehaltender Spannung bewirkt die Ermüdung eine progressive Zunahme der elastischen und viskosen Dehnungen, die schließlich im Materialversagen enden.

2.5.1 Dissipierte Energie

In der Thermodynamik ist der Begriff der dissipierten Energie definiert. Gemäß dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik treten in einem geschlossenen Systems (z.B. Probekörper) [21] keine Energieverluste auf. Energie, die von außen (durch Belastung) in das System eingeführt wird, muss dort in eine andere Energieform (z.B. Bewegung, Formänderung, Wärme, Schall, Strukturschädigung) umgesetzt werden. Das rheologische Grundelement Feder ist in der Lage, die eingebrachte Energie vollständig durch Verformung zu speichern und spontan wieder vollständig abzugeben. Die von außen eingebrachte kinetische Energie ($\text{Kraft} \times \text{Weg}$) wird als potentielle Energie ($\text{Federsteifigkeit} \times \text{Weg}$) gespeichert und ist weiterhin im System verfügbar. Ein Dämpfer hingegen wandelt die eingetragene kinetische Energie durch Reibung in Wärme um. Diese wird in der Regel zügig abgegeben und geht dem System verloren, ist also dissipiert. Bei kombinierten rheologischen Modellen kann das Zusammenspiel von Feder und Dämpfer eine zeitverzögerte Energieumwandlung bewirken. Im Falle des Voigt-Kelvin-Modells verzögert der Dämpfer die Reaktion der Feder.

2.5.2 Ermüdungsversuche

Zur Bestimmung des Ermüdungsverhaltens speziell von Asphalt wurden zahlreiche Prüfverfahren entwickelt, von denen einige den Asphaltprobekörper einer wechselnden Beanspruchung aussetzen (Wechsel zwischen Zug- und Druckbeanspruchung, meist gleichen Betrags), während zum Beispiel in einaxialen Zug-Schwellversuchen der Probekörper mit einer schwellenden Zugbelastung beansprucht wird.

Weiterhin muss zwischen kraft- und weggeregelten Versuchen unterschieden werden. Bei kraftgeregelten Prüfungen wird der Probekörper mit einem geregelten Kraftsignal belastet. Verringert sich seine Steifigkeit, wird dadurch eine Zunahme der Dehnungsreaktion erzeugt. Durch die Ermüdung wird im Laufe der Prüfung mehr

Energie dissipiert als zu Beginn des Versuchs, sodass der Ermüdungsfortschritt beschleunigt wird. Bei weggeregelten Prüfungen wird dem Probekörper eine Dehnung aufgezwungen, wodurch er innere Spannungen erzeugt. Hierbei bewirkt eine Steifigkeitsabnahme infolge Ermüdung eine Reduktion der je Lastwechsel dissipierten Energie, wodurch der Ermüdungsfortschritt verzögert wird.

Unter Anwendung der rheologischen Modellvorstellung ergeben sich durch die Prüfbedingungen grundlegend unterschiedliche Auswirkungen auf die gemessene Materialreaktion. Abbildung 2-9 zeigt ein durch ein abwechselnd mit Zug- und Druckspannungen beanspruchtes Burgers-Modell. Die Reaktionen der in Reihe geschalteten Einzelemente sind einzeln dargestellt. Zu Beginn der ersten Lastwechsel reagieren die bis dahin unbeanspruchten und unverformten Elemente solitärer Dämpfer (λ_1) und Voigt-Kelvin-Modell zunächst mit einer starken Dehnungsreaktion. Der Wechsel der Beanspruchungsrichtung (von Zug auf Druck) bewirkt durch die zeitverzögerte Reaktion des Dämpferelements nach dem ersten Lastwechsel einen Rückgang auf die Anfangsdehnung ($\varepsilon_{\lambda_1} = 0$). Beim zweiten Lastwechsel liegen im solitären Dämpfer wieder die gleichen Vorbedingungen vor, sodass die darauffolgenden Dehnungsreaktionen identisch ausfallen.

Beim Voigt-Kelvin-Element wird die zunächst im Federelement gespeicherte Zugspannung wieder abgebaut. Dadurch wird die Reaktion in entgegengesetzter Richtung verzögert und verringert. Zu Beginn des zweiten Lastwechsels liegen im Voigt-Kelvin-Modelle wiederum der Last entgegengerichtete innere Spannungen vor, sodass die Dehnungsreaktion beim zweiten Lastwechsel in Zugrichtung geringer, in Druckrichtung hingegen höher als beim ersten Lastwechsel ausfällt. Mit jedem Lastwechsel relaxiert die einseitig höhere innere Spannung, sodass das Voigt-Kelvin-Element nach einer gewissen Zeit gleichmäßig um die Dehnung 0 schwingt.

Während Versuche mit Wechselbeanspruchung keinen Aufbau akkumulierter bleibender Dehnungen aufweisen, bewirkt die der sinusförmigen Spannungsschwingung überlagerte konstante mittlere Spannung σ_m einen im Versuchsverlauf zu beobachtenden Dehnungszuwachs in Form einer Impulskriechkurve (vgl. Abbildung 2-7).

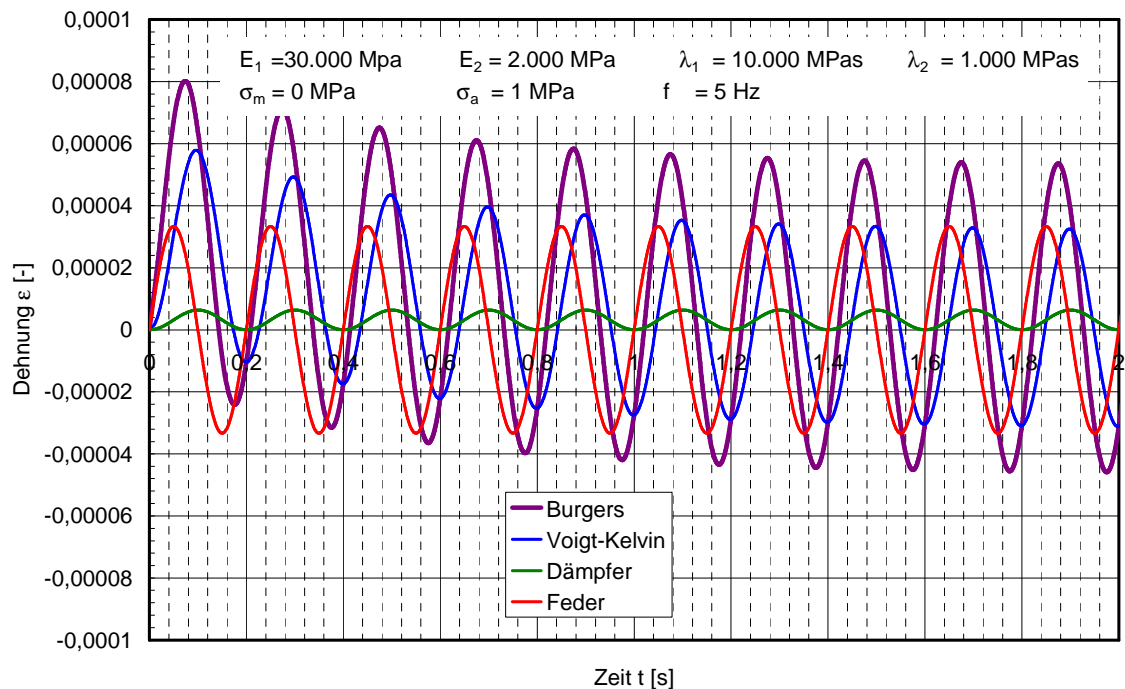


Abbildung 2-9: Berechnete Dehnung und Dehnungsanteile der Einzelemente des Burgers-Modells infolge einer sinusförmigen Wechsellast (nach Gleichung 2.13)

Die Impulskriechkurve eines Schwellversuchs wird in vielen Veröffentlichungen (z.B. [16]) als dreiphasige Kurve beschrieben, siehe Abbildung 2-10. Die erste Phase wird mit zu Beginn starken Verformungen mit progressiv abnehmender Verformungsgeschwindigkeit beschrieben, deren Verlauf mit Konsolidierungs- oder Anpassungsvorgängen erklärt wird. Daran schließt ein Bereich mit nahezu konstanter Verformungsgeschwindigkeit an. In der dritten Phase nimmt die Verformungsgeschwindigkeit wieder zu.

Die beiden ersten idealisierten Phasen der Impulskriechkurve können mit Hilfe des Burgers-Modells beschrieben werden. Die Impulskriechkurve beginnt mit einer bestimmten Dehnungsgeschwindigkeit, die den Betrag $(\sigma_m/\lambda_1 + \sigma_m/\lambda_2)$ hat. Im folgenden Verlauf nimmt die Dehnungsänderung des Voigt-Kelvin-Körpers asymptotisch ab, sodass der einfache Dämpfer für einen Zuwachs an Dehnung sorgt und die konstante Dehnungszunahme bestimmt.

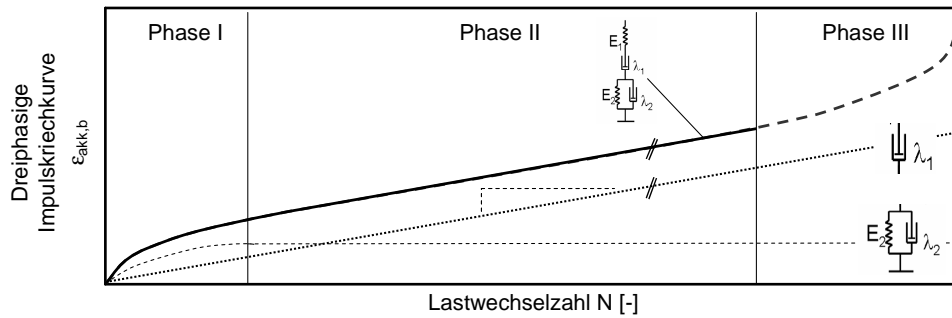


Abbildung 2-10: Dreiphasige Impulskriechkurve eines Schwellversuchs

Die tatsächlich bei Asphaltprüfungen auftretenden Impulskriechkurven zeigen einen anderen Verlauf (vgl. Abbildung 2-11). Dort kann keine zweite Phase beobachtet werden, die eine konstante Dehnungsgeschwindigkeit aufweist. So nimmt die Dehnungsgeschwindigkeit bis zum Erreichen eines Wendepunktes ab, um danach wieder progressiv anzusteigen.

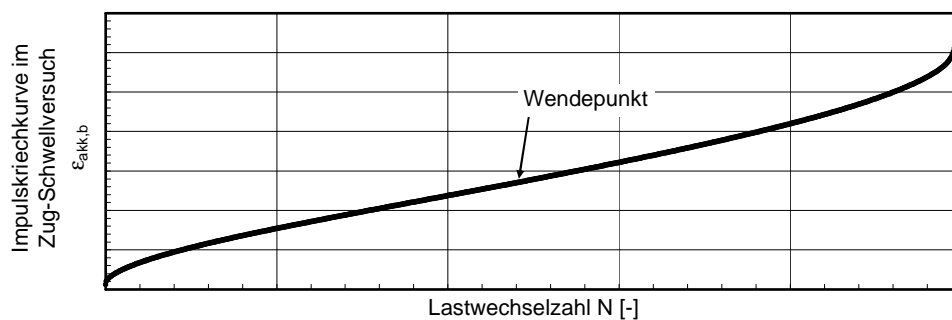


Abbildung 2-11: Impulskriechkurve im Zug-Schwellversuch (Verlauf der akkumulierten beleibenden Dehnung)

Das Burgers-Modell reicht demnach nicht aus, um das Auftreten des Wendepunktes zu erklären. Für die Beschreibung der dritten Verformungsphase muss das Burgers-Modell mit einer Schädigungstheorie kombiniert werden.

2.5.3 Schädigungsmodelle

Oeser [26] beschreibt in seinem Modell zur dreidimensionalen numerischen Simulation die im Asphalt auftretenden Schädigungs- und Heilungsphänomene mit Hilfe eines mit dem Burgers-Modell in Reihe geschalteten zusätzlichen Elementes. In diesem werden tertiäre Dehnungsänderungen ϵ^{tr} nach Gleichung 2.28 durch die Spannung und die beiden Schädigungsparameter $D^{(1)}$ und $D^{(2)}$ bestimmt.

$$\dot{\varepsilon}^{\text{tr}} = D^{(1)} \cdot \varepsilon^{\text{tr}} + D^{(2)} \cdot \sigma \quad \text{Gleichung 2.28}$$

Für eine konstante Spannung, die zu einem Zeitpunkt $t = t_2$ plötzlich in das Schädigungsmodell eingeleitet wird, ergibt sich Gleichung 2.29 als Lösung der Differenzialgleichung 2.28.

$$\varepsilon^{\text{tr}} = \begin{cases} 0 & \text{für } t < t_2 \\ \frac{D^{(2)}}{D^{(1)}} \cdot \left(e^{D^{(1)} \cdot (t-t_2)} - 1 \right) \cdot \sigma & \text{für } t \geq t_2 \end{cases} \quad \text{Gleichung 2.29}$$

Für Zeitpunkte $t < t_2$ werden die tertiären Dehnungen per Definition gleich null gesetzt. Ab dem Zeitpunkt t_2 , an dem eine Schädigung des Materials einsetzt, steigen die tertiären Dehnungen in Form einer Exponentialfunktion an. Für die in [24] untersuchten Asphalte konnten die in Tabelle 2.2 aufgestellten Schädigungsparameter $D^{(1)}$ und $D^{(2)}$ aus einaxialen Zug-Schwellversuchen ermittelt werden.

Tabelle 2.2: Von Oeser aus Zug-Schwellversuchen ermittelte Schädigungsparameter $D^{(1)}$ und $D^{(2)}$ dreier Asphalte [24]

Asphaltvariante	$D^{(1)}$	$D^{(2)}$
SMA 0/11 S	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,505 \cdot 10^{-4}$
ABi 0/16 S	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$
ATS 0/22 CS	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$

Anschaulich ist diese Interpretation der Materialschädigung schwer zu begründen, da das verwendete rheologische Modell ein Element enthält, das zu Beginn der Belastung „ruht“ und erst ab einem gewissen Zeitpunkt t_2 „eingeschaltet“ wird. Diese Unstetigkeit im zeitlichen Verlauf ist bei realen Materialien, die einer kontinuierlichen Beanspruchung unterliegen, nicht anzutreffen. Daher ist für die Interpretation der Materialschädigung eine Theorie zu bevorzugen, bei der die Schädigung kontinuierlich wirkt.

2.5.4 Schädigung infolge Risswachstum

Durch die wiederholte Beanspruchung eines Asphaltmaterials durch Zugspannungen können innerhalb des Materials Risse auftreten. Diese schwächen den tragenden Querschnitt, sodass gleich große von außen wirkende Kräfte zu höheren Beanspruchungen des Materials führen. Diese größeren Spannungen bewirken eine Zunahme

der Dehnungsreaktion des Asphaltes, wodurch große Verformungen und eine weitere, beschleunigte Materialschädigung eintreten können.

In einaxialen Zugversuchen ergibt sich die Spannung σ_0 innerhalb des Probekörpers aus dem Quotienten der von außen wirkenden Kraft F und der Querschnittsfläche A_0 (vgl. Gl. 2.30).

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0} \Leftrightarrow F = \sigma_0 \cdot A_0 \quad \text{Gleichung 2.30}$$

Wird der belastete Asphaltkörper durch Rissbildung (Fläche des gerissenen Querschnitts: A_R) geschwächt, so steht nur eine verringerte Querschnittsfläche A_S zur Verfügung, um die von außen wirkende Kraft zu ertragen. Bei gleichem Kraftbetrag muss die verbleibende Querschnittsfläche demzufolge eine im Vergleich zu σ_0 höhere Spannung ertragen σ_S (vgl. Gl. 2.31).

$$\sigma_S = \frac{F}{A_S} = \frac{\sigma_0 \cdot A_0}{A_0 - \Sigma A_R} = \sigma_0 \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Sigma A_R}{A_0}} \quad \text{Gleichung 2.31}$$

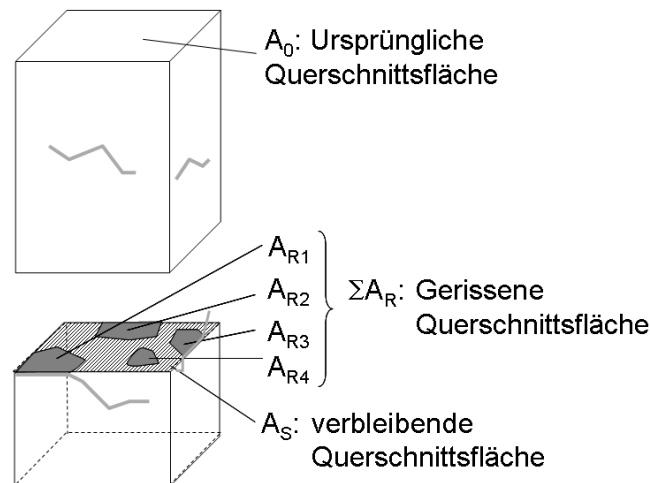


Abbildung 2-12: Ursprüngliche A_0 und nach Rissbildung der Fläche ΣA_R geschädigte Querschnittsfläche A_S eines prismatischen Probekörpers aus Asphalt

Beim ungeschädigten, rissfreien Probekörper ist die Rissfläche $A_R = 0$, sodass der gesamte Querschnitt A_0 bei der Lastabtragung mitwirkt. Mit zunehmender Rissfläche wird der Quotient A_R/A_0 größer, sodass die effektiv wirkende Spannung σ_S ansteigt. Nähert sich die Rissfläche A_R der ursprünglich tragenden Fläche A_0 an, so strebt der Flächenquotient den Wert 1 an und die wirkende Spannung nähert sich einem

unendlich hohen Wert. Der Probekörper versagt, wenn die Rissfläche den Wert der ursprünglichen Querschnittsfläche erreicht. Die wirkende Spannung wird unendlich hoch und der Probekörper bricht auseinander.

Zur Beschreibung des durch Materialschädigung geprägten tertiären Dehnungsreiches in Kriechversuchen mittels Burgers-Modells führt Gartung [18] eine Schädigungsfunktion $D(t)$ ein, mit der die im Dämpferelement des Maxwell-Modells wirkende Spannung erhöht wird, während die auf die restlichen Elemente wirkende Spannung konstant bleibt. Die im Dämpfer wirkende Spannung $\bar{\sigma}$ wird nach Gleichung 2.32 mit Hilfe der Materialparameter (z.B. $B = 5,06$; $r = 6,5$; $\kappa = 15,3$ [9]) modifiziert.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad \text{mit} \quad D(t) = 1 - \left(1 - \left(\frac{\sigma}{B} \right)^r \cdot t \cdot (\kappa + 1) \right)^{\frac{1}{\kappa+1}} \quad \text{Gleichung 2.32}$$

Aschenbrenner [7] wählt einen Ansatz, in dem die Schädigung eine Abnahme der für den Lastabtrag zur Verfügung stehenden Fläche bewirkt. Die Querschnittsfläche wird um den Schädigungsbetrag D verringert, sodass auf dem verbleibenden tragenden Querschnitt eine erhöhte Spannung $\bar{\sigma}$ wirkt. Einem Ansatz von Rabotnov folgend kann für die Simulation der einaxialen Kriechschädigung für D die in Gleichung 2.33 angegebene Differentialgleichung verwendet werden.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad \text{mit} \quad \dot{D} = \left(\frac{\sigma}{B} \right)^r \cdot \left(\frac{1}{1-D} \right)^{\kappa} \quad \text{Gleichung 2.33}$$

Die Schädigungszunahme \dot{D} wird bei einem noch ungeschädigten Körper ($D = 0$) allein durch die Höhe des Spannungsquotienten σ/B und den Exponenten r bestimmt. Bei konstanter Spannung bleibt der Schädigungszuwachs zunächst quasi konstant, d.h. die Schädigung nimmt linear zu. Je weiter die Schädigung voranschreitet (D wird größer), desto stärker bestimmt der zweite Term den weiteren Verlauf der Schädigungsfunktion. Durch immer größere Schädigungen D wird der mit κ potenzierte Term größer, wodurch der Schädigungsfortschritt beschleunigt wird. Sobald der Schädigungsparameter D den Wert 1 erreicht, ist der Last übertragende Querschnitt aufgebraucht und der Körper versagt.

Bodin [9] wählt zur Berechnung der äquivalenten Dehnung $\bar{\epsilon}$ eines durch einen dreidimensionalen ($i = 3$) Spannungszustand beanspruchten Körpers Gleichung 2.34 unter Verwendung der in Gleichung 2.35 angegebenen Differentialgleichung. Durch die Auswertung von weggeregelten einaxialen Zug/Druck-Wechselversuchen mit der Dehnungsamplitude ϵ_a konnte er die Differenzialgleichung zu Gleichung 2.36 lösen und ermittelte die die Schädigung beschreibenden Parameter zu $\beta = 5$; $C = 4,1 \cdot 10^6$ und $\alpha = -2,25$.

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\left(\frac{(|\sigma_i| + \sigma_i)}{2 \cdot E_0 \cdot (1-D)} \right)^2 \right)} \quad \text{Gleichung 2.34}$$

$$\dot{D} = C \cdot D^\alpha \cdot \bar{\epsilon}^\beta \cdot \dot{\bar{\epsilon}} \quad \text{Gleichung 2.35}$$

$$D = \left(\frac{C \cdot (1-\alpha)}{(1+\beta)} \cdot \epsilon_a^{\beta+1} \right)^{1-\alpha} \quad \text{Gleichung 2.36}$$

Baaj [8] wertet weggeregelte Zug/Druck-Wechselversuche hinsichtlich des Verlaufes der Steifigkeit aus. Neben dem konventionellen Ermüdungskriterium, der Abnahme der Steifigkeit auf die Hälfte ihres anfänglichen Betrages, wendet er zur Auswertung der Versuche die von Di Benedetto vorgeschlagene Auswertemethode „DGCS“ an, in der die Steigung der quasi-linearen Phase der E-Modul-Abnahme α_T als ermüdungsrelevanter Kennwert verwendet wird. Er benutzt Ermüdungskurven, in denen die lineare Steifigkeitsabnahme α_T mit der angewendeten Dehnungsamplitude kombiniert wird, um die Auswirkungen der Polymermodifikation auf das Ermüdungsverhalten von Asphalten nachzuweisen.

Die Zusammenstellung der verschiedenen Modelltheorien zur Beschreibung und Simulation der inneren Schädigung zeigt, dass durch die Annahme der infolge Ermüdung herabgesetzten tragenden Querschnittsfläche das Materialverhalten von Asphalt beschrieben werden kann. In der vorliegenden Arbeit wird diese Theorie für die Interpretation von Zug-Schwellversuchen herangezogen. Damit soll geprüft werden, ob die unterschiedlichen Verläufe der einzelnen Dehnungskomponenten einheitlich beschrieben werden können.

3 Untersuchungsprogramm

3.1 Untersuchte Asphalte

Die in dieser Arbeit vorgestellten Forschungsergebnisse wurden an neun Asphaltvarianten gewonnen, deren Zusammensetzungen in Tabelle 3.1 und deren Korngrößenverteilungen in Abbildung 3-1 aufgeführt sind. Das Asphaltmischgut wurde großtechnisch in Asphaltmischanlagen hergestellt. Die in [35] untersuchten Asphalte wurden kurz nach dem Mischprozess in Probeweimer gefüllt. Im Laboratorium des Institutes für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig wurde das Mischgut wiedererwärmt, um daraus Asphaltplatten mittels Walzsektorverdichtung [12] herzustellen. Aus diesen wurden dann die Probekörper senkrecht zur Walz- und Verdichtungsrichtung herausgeschnitten.

Aus den in [24] untersuchten Asphalten wurde auf dem Gelände der Mischanlage eine Probestrecke angelegt, aus der Bohrkern entnommen wurden. Nach der Trennung der einzelnen Schichten aus den Bohrkernen wurden die Probekörper aus den Bohrkernscheiben senkrecht zur Walz- und Verdichtungsrichtung herausgeschnitten.

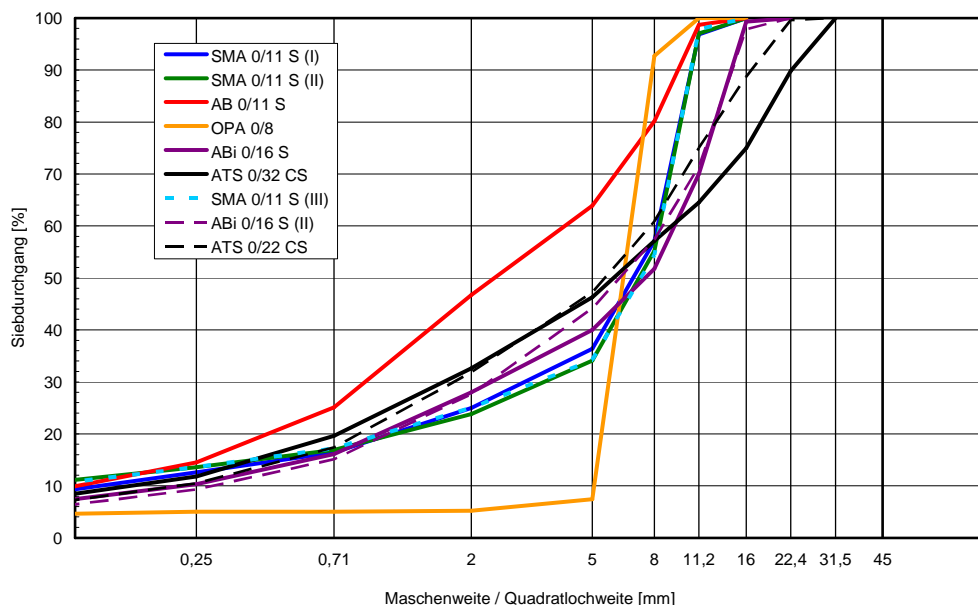


Abbildung 3-1: Korngrößenverteilungen der untersuchten Asphaltgemische

Tabelle 3.1: Zusammensetzung der untersuchten Asphaltvarianten

		[35]						[24]		
		SMA 0/11 S (I) (SMA 11 S)	SMA 0/11 S (II) (SMA 11 S)	AB 0/11 S (AC 11 DS)	OPA 0/8 (PA 8)	ABi 0/16 S (I) (AC 16 BS)	ATS 0/32 CS (AC 32 TS)	SMA 0/11 S (III) (SMA 11 S)	ABi 0/16 S (II) (AC 16 BS)	ATS 0/22 CS (AC 22 TS)
Eigenschaften der Gesteinskörnungen										
Gesteinsart		Gabbro	Kiessplitt					Granit		Kies-splitt
Rohdichte Gestein $\rho_{R,M}$ [g/cm ³]		2,860	2,701	2,698	2,645	2,700	2,700	2,708	2,682	2,730
[%]	< 0,09mm	9,2	11,0	9,5	4,6	7,0	8,2	10,5	6,1	6,9
	< 2,0 mm	15,3	13,0	37,5	0,6	21,0	24,2	14,5	21,5	24,9
	> 2,0 mm	73,5	76,0	53,0	94,8	72,0	67,6	75,0	72,4	68,2
Anteil gebr. Gesteinsk.		C _{100/0}	C _{90/1}	C _{90/1}	C _{90/1}	C _{90/1}	C _{90/1}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{90/1}
Bindemittleigenschaften										
Bindemittelart		PmB 45 A	PmB 45 A	50/70	40-100/6 5 H	PmB 45 A	50/70	50/70	PmB 45 A	50/70
EP _{RuK} [°C] ¹⁾		n.e.	62	52	87	60	52	54	63	54
EP _{RuK} [°C] ²⁾		65	67	54	72	64	56	61	71	60
Bindemittelgehalt B [%]		6,2	6,7	6,0	6,2	4,5	4,2	6,5	4,3	4,4
Mischguteigenschaften										
Raumdichte MPK ρ_A [g/cm ³]		2,538	2,351	2,401	1,803	2,365	2,391	2,350	2,359	2,399
Rohdichte $\rho_{R,bit}$ [g/cm ³]		2,608	2,432	2,476	2,414	2,514	2,545	2,438	2,507	2,552
Hohlraumgehalt V _m ' [Vol.-%] (MPK)		2,7	3,4	3,0	25,3	5,9	6,1	3,6	5,9	6,0
Probekörperherstellung										
Mischgut-herstellung		Großtechnische Produktion								
Probekörper-herstellung		Gewinnung der Probekörper aus walzsektorverdichteten Asphaltplatten						Gewinnung der Probekörper aus Bohrkernen, entnommen aus einer Probestrecke		
Mittlerer Hohlraumgehalt V _m [Vol.-%] (Probekörper)		3,1	2,7	2,9	24,4	4,3	6,7	3,6	5,1	4,0

1) Im Anlieferungszustand laut Eignungsprüfung

2) am zurück gewonnenen Bindemittel

3.2 Zug- und Abkühlversuch

3.2.1 Prüfeinrichtung

Abbildung 3-2 zeigt die am Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig entwickelte Prüfeinrichtung [4,5] für die Durchführung von statischen Versuchen mit einaxialer Zugbeanspruchung bei mittleren und tiefen Temperaturen, die durch eine langsam aufgebrachte Beanspruchung gekennzeichnet sind. Abkühl-, Zug- und Retardationsversuche werden mit jeweils unterschiedlichen vorgegebenen Belastungen an drei Prüfmaschinen gleicher Bauart gefahren.

Kernstück der Prüfeinrichtungen ist ein biegesteifer Prüfrahmen, an dessen Grundplatte ein Schrittmotor mit Getriebeeinheit befestigt ist. Die obere Traverse trägt eine Kraftmesseinrichtung (± 20 kN oder ± 50 kN). Ein mit den Stirnseiten an Adapter geklebter Probekörper kann mittels kardanischer Ösen zwischen Kraftmessdose und Getriebeeinheit eingehängt werden, siehe Abbildung 3-2. Über den Schrittmotor können Verschiebungen in vertikaler Richtung erzwungen werden. Die in Richtung der Längsachse des Probekörpers auftretenden Kräfte werden von der Kraftmessdose erfasst. Die axiale Verformung des Probekörpers wird mit zwei Wegaufnehmern ($\pm 2,5$ mm) mit Dehnmessstreifen gemessen. Die Wegmesseinrichtungen sind an speziellen Messbasen befestigt, die bei Temperaturänderung keine thermische Dehnung erfahren. Durch die kardanische Aufhängung der Adapter wird die Ausbildung von Querkraften und Momenten im Probekörper verhindert. Der Prüfrahmen ist in einem Temperierschrank installiert, wodurch Prüfungen bei Temperaturen zwischen $+60^{\circ}\text{C}$ und -40°C durchgeführt werden können. Ein an die Prüfeinrichtung angeschlossener Computer dient der Steuerung und Regelung der Versuche sowie der Aufzeichnung und Ausgabe der Daten aus Temperatur-, Kraft- und Wegmessung.

Die Probekörper werden senkrecht zur Walz- und Verdichtungsrichtung aus walzsektorverdichteten Platten oder Bohrkernscheiben gesägt. Die verwendeten Abmessungen der prismatischen Probekörper sind in Tabelle 3.2 zusammengestellt. Die zu prüfenden Probekörper werden mittels Zweikomponentenkleber auf Epoxydharzbasis mit den Stirnseiten auf Adapter geklebt. Durch die Lagerung auf Klebebänken von mindestens 24 Stunden wird eine dauerhafte Klebeverbindung sichergestellt.

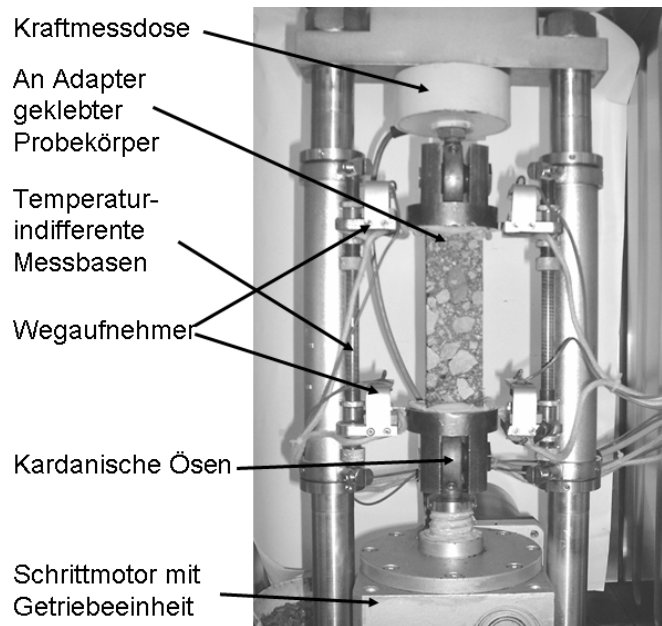


Abbildung 3-2 Prüfeinrichtung für Abkühl-, Zug- und Retardationsversuche

Tabelle 3.2: Probekörperabmessungen

Asphaltart:	Deckschichtasphalt	Binderschichtasphalt	Tragschichtasphalt
Probekörper- abmessungen B×H×L [mm³]	40 × 40 × 160	50 × 50 × 160	80 × 80 × 160

Während der Durchführung der verschiedenen Versuchstypen werden die Signale der Weg- und Kraftmesseinrichtungen kontinuierlich gemessen und nach Versuchsende gespeichert. Die axiale Spannung σ wird berechnet, indem die gemessene Kraft F durch die Querschnittsfläche A (Breite $B \times$ Höhe H) des Probekörpers geteilt wird ($\sigma = F/A$). Die Längsdehnung ε ergibt sich aus dem Quotienten des zum Messzeitpunkt gemessenen Weges s bezogen auf die vor der Prüfung gemessene Probekörperlänge L ($\varepsilon = s/L$).

3.2.2 Abkühlversuch

Zur Ermittlung der bei tiefen Temperaturen durch behinderte thermische Dehnung auftretenden kryogenen Zugspannungen werden Abkühlversuche gemäß der technischen Prüfvorschrift „Verhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen; Ausgabe 1994“ [15] durchgeführt.

Dabei wird ein an Adapter geklebter prismatischer Probekörper der Länge nach in die Prüfeinrichtung eingespannt und einer vorgegebenen Abkühlrate \dot{T} ausgesetzt. Die Deckschichtasphalte wurden mit einer Abkühlrate von $\dot{T} = 10 \text{ K/h}$, die Asphaltbindervarianten mit $\dot{T} = 7 \text{ K/h}$ und die Asphalttragschichten mit $\dot{T} = 4 \text{ K/h}$ geprüft. Während des Abkühlvorgangs wird die Probekörperlänge konstant gehalten. Durch die Messung der Probekörperlänge über temperaturindifferente Messbasen kann die unvermeidliche Temperaturdehnung des Prüfrahmens vom Schrittmotor ausgeglichen werden. Durch den behinderten thermischen Schrumpf werden im Probekörper abkühlbedingte – so genannte kryogene – Zugspannungen induziert. Erreichen die kryogenen Spannungen die Zugfestigkeit des Probekörpers, kommt es zum Bruch. Als Ergebnis der Prüfung werden die kryogenen Zugspannungen $\sigma_{\text{kry}}(T)$ in Abhängigkeit von der Temperatur sowie die erreichte Bruchtemperatur T_{Br} und die Bruchspannung σ_{Br} ausgegeben.

3.2.3 Zugversuch

Zur Ermittlung der einaxialen Zugfestigkeit von Asphalt werden weggeregelte Zugversuche gemäß [15] bei vier verschiedenen Temperaturen ($T = -25^\circ\text{C}$, -10°C , $+5^\circ\text{C}$, $+20^\circ\text{C}$) durchgeführt. Der in die Prüfeinrichtung eingespannte Probekörper wird während der Temperierphase spannungsfrei auf die Prüftemperatur gebracht. Nach der Temperierphase wird er mit einer Verformungsgeschwindigkeit von $\dot{s} = 1 \text{ mm/min}$ bis zum Erreichen der Zugfestigkeit gezogen. Die Zugfestigkeit ist die bei Auftreten eines Bruches des Probekörpers erreichte Spannung oder – bei hohen Prüftemperaturen tritt kein Bruch auf – die maximal erreichte Zugspannung. Als Versuchsergebnisse werden die bei der Prüftemperatur erreichte Zugfestigkeit $f_z(T)$ sowie die dabei gemessene Bruchdehnung $\varepsilon_{\text{Br}}(T)$ ausgegeben.

3.2.4 Zugfestigkeitsreserve

Die aus den Einzelergebnissen berechneten Mittelwerte der Zugfestigkeit werden über die jeweilige Prüftemperatur aufgetragen. Zur Abschätzung der Zugfestigkeit bei nicht geprüften Temperaturen werden die Messpunkte mit einem kubischen Spline verbunden.

Die Differenz aus der Zugfestigkeit und der in den Abkühlversuchen ermittelten kryogenen Spannung ergibt zu jeder Temperatur die Zugfestigkeitsreserve $\Delta f_z(T)$ (vgl. Gleichung 3.1). Sie ist ein theoretisches Maß für die mechanogene Spannung, die der Probekörper zusätzlich zu der kryogenen Spannung schadlos ertragen kann. Die Temperatur $T(\Delta f_{z,max})$, bei der die Zugfestigkeitsreserve ihr Maximum aufweist, ist eine Kenngröße, die sich zur Einschätzung und zum Vergleich der Kälteempfindlichkeit des Asphaltes eignet.

$$\Delta f_z(T) = f_z(T) - \sigma_{kry}(T) \quad (\text{Gleichung 3.1})$$

3.2.5 Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche

Alle Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche sind in Anlage 1 zusammengestellt. Die Abbildungen zeigen die Einzelwerte, die Mittelwerte und den Verlauf der Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Prüftemperatur zusammen mit dem Graphen der kryogenen Spannung und der ermittelten Zugfestigkeitsreserve. In den Tabellen sind die mit Zugversuchen ermittelten Einzelwerte der Zugfestigkeit und Bruchdehnungen sowie deren Mittelwert und Standardabweichung aufgelistet. Weiterhin sind die Ergebnisse der Abkühlversuche (Bruchtemperatur und Bruchspannung) sowie die Temperatur und Höhe des Maximums der Zugspannungsreserve enthalten.

In Abbildung 3-3 sind die Verläufe der Zugfestigkeitsreserven aller untersuchten Asphalte in Abhängigkeit von der Temperatur vergleichend einander gegenüber gestellt. Auffällig ist zunächst, dass die Probekörper aus offenporigem Asphalt die geringsten Zugfestigkeitsreserven aufweisen. Dies kann auf den im Vergleich zu den anderen Asphalten deutlich höheren Hohlraumgehalt zurückgeführt werden, da beim offenporigen Asphalt infolge der enggestuften Korngrößenverteilung die Kontaktflächen zwischen den Einzelkörnern bei gleicher von außen wirkender Belastung deutlich stärker beansprucht werden als bei Asphalten, die aufgrund ihrer weit gestuften Korngrößenverteilung geringere Hohlraumgehalte und somit eine größere wirksame Querschnittsfläche aufweisen.

Die unterschiedlich hohen Werte der Zugfestigkeiten und der Zugfestigkeitsreserve der anderen Asphalte werden durch die unterschiedliche Korngrößenverteilung sowie die verwendeten Bindemittel verursacht.

Die Darstellung der Zugfestigkeitsreserven in Abhängigkeit von der Temperatur und dabei besonders der Temperaturwert, bei dem die maximale Zugfestigkeitsreserve $T(\Delta f_{Z,max})$ erreicht wird, verdeutlicht die unterschiedliche Ausprägung der Rissresistenz bei tiefen Temperaturen.

Die tiefe Temperatur, bei der die Zugfestigkeitsreserve des offenporigen Asphalts ihr Maximum erreicht ($T(\Delta f_{Z,max}) = -10,6\text{ °C}$), zeigt deutlich die Wirkung des verwendeten höher modifizierten Bindemittels.

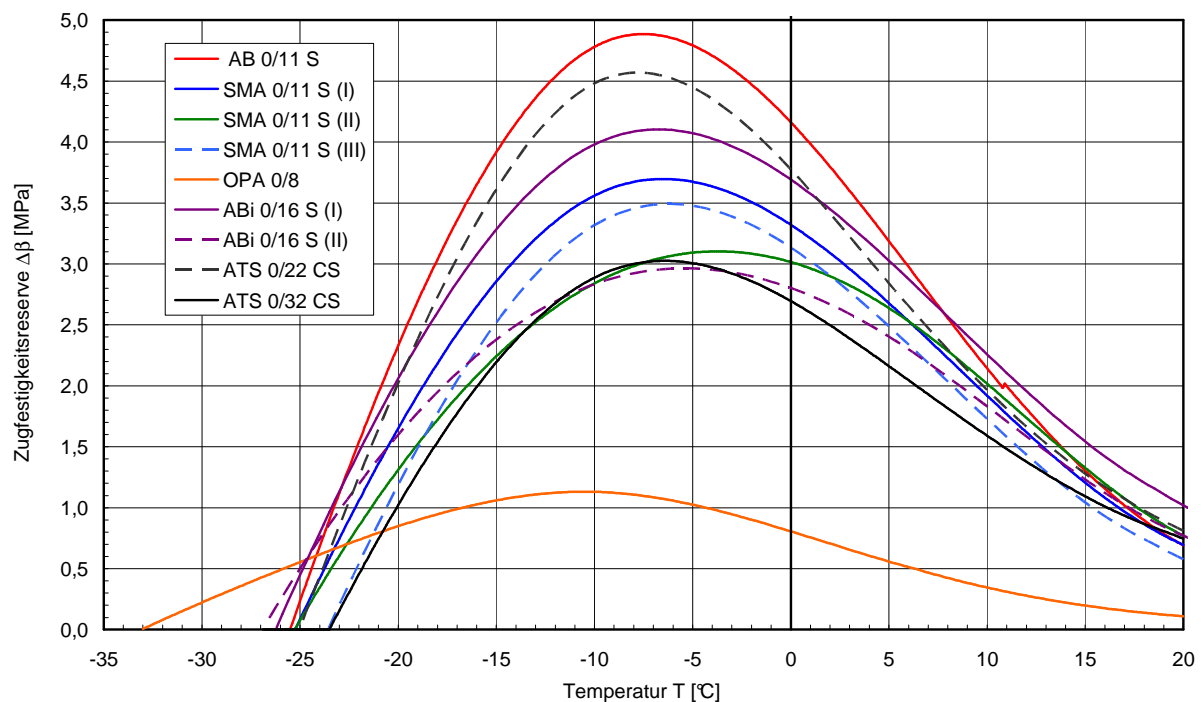


Abbildung 3-3: Zugfestigkeitsreserven der untersuchten Asphalte im Vergleich

Abbildung 3-4 zeigt die in den Zugversuchen erreichten Bruchdehnungen ϵ_{Br} in Abhängigkeit von der Temperatur für alle untersuchten Asphalte. Zur besseren Erkennbarkeit sind durch Regressionsrechnung aus den Messdaten Exponentialfunktionen ermittelt und dargestellt worden, die zwar hohe Bestimmtheitsmaße erreichen, sich jedoch wegen teilweise sehr großer Abweichungen der Messdaten von dieser Funktion nur bedingt für weitere Berechnungen eignen (vgl. SMA 0/11 S (II) bei -10 °C). Deutlich ist zu erkennen, dass die Bruchdehnung bei sinkender Temperatur exponentiell abnimmt. Bei $+5\text{ °C}$ und $+20\text{ °C}$ weist der OPA 0/8 die höchsten Bruchdehnungen auf, während das Asphaltbinder- und -tragschichtmaterial die geringsten Dehnungen erreichen. Bei -10 °C und -25 °C

weisen die Probekörper aus ABi 0/16 S und ATS 0/32 CS die höchsten Bruchdehnungen auf.

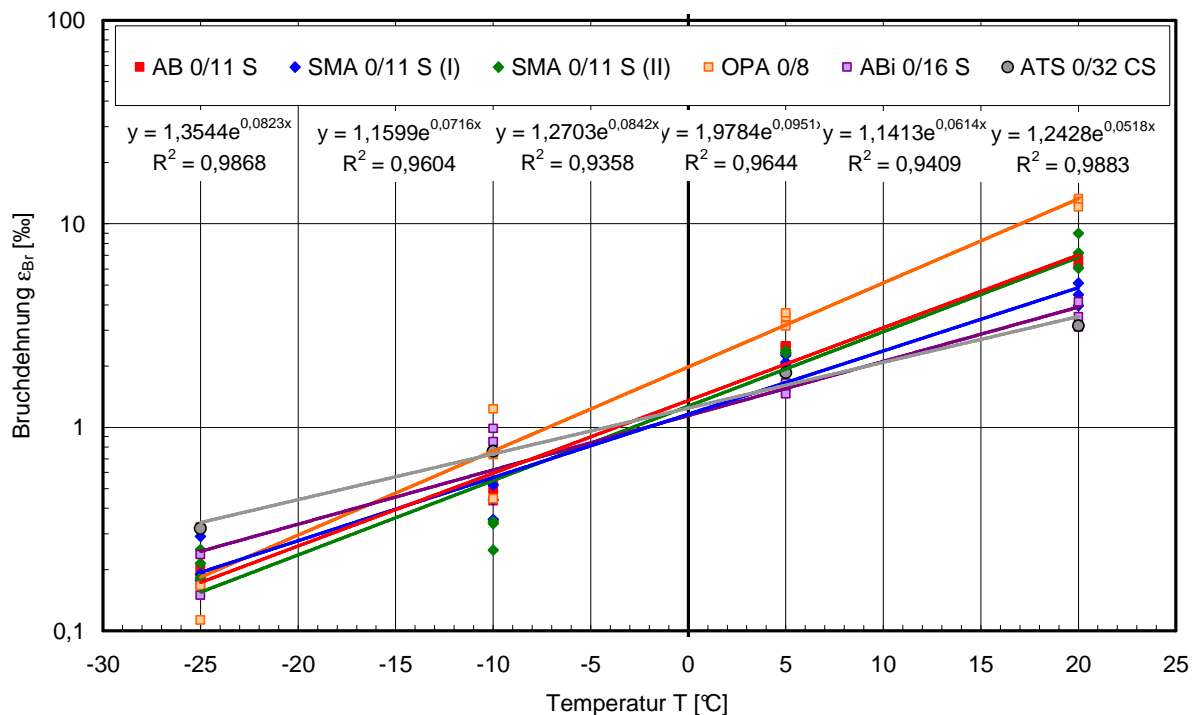


Abbildung 3-4: In Zugversuchen ermittelte Bruchdehnungen ε_{Br} in Abhängigkeit von der Temperatur

In Abbildung 3-5 ist der prozentuale Anteil der Zugfestigkeitsreserve an der Zugfestigkeit dargestellt. Durch diese Darstellungsform werden die unterschiedlichen Spannungsniveaus der einzelnen Asphalte relativiert. Dadurch ist die unterschiedliche temperaturabhängige Ausprägung der Eigenschaften der Asphalte deutlicher zu erkennen. Durch das höher polymermodifizierte Bindemittel zeigt der offenporige Asphalt bei tiefen Temperaturen unter -10 °C die höchste auf die Zugfestigkeit bezogene Zugfestigkeitsreserve. Die drei Splittmastixasphalte dagegen zeigen bei Temperaturen $> -20\text{ °C}$ mit dem ABi 0/16 S (II) die geringsten relativen Reserven.

In Tabelle 3.3 sind die bei der Durchführung der Zug-Schwellversuche (siehe Kapitel 3.4) als Unterspannungen angesetzt, kryogenen Spannungen zusammengestellt.

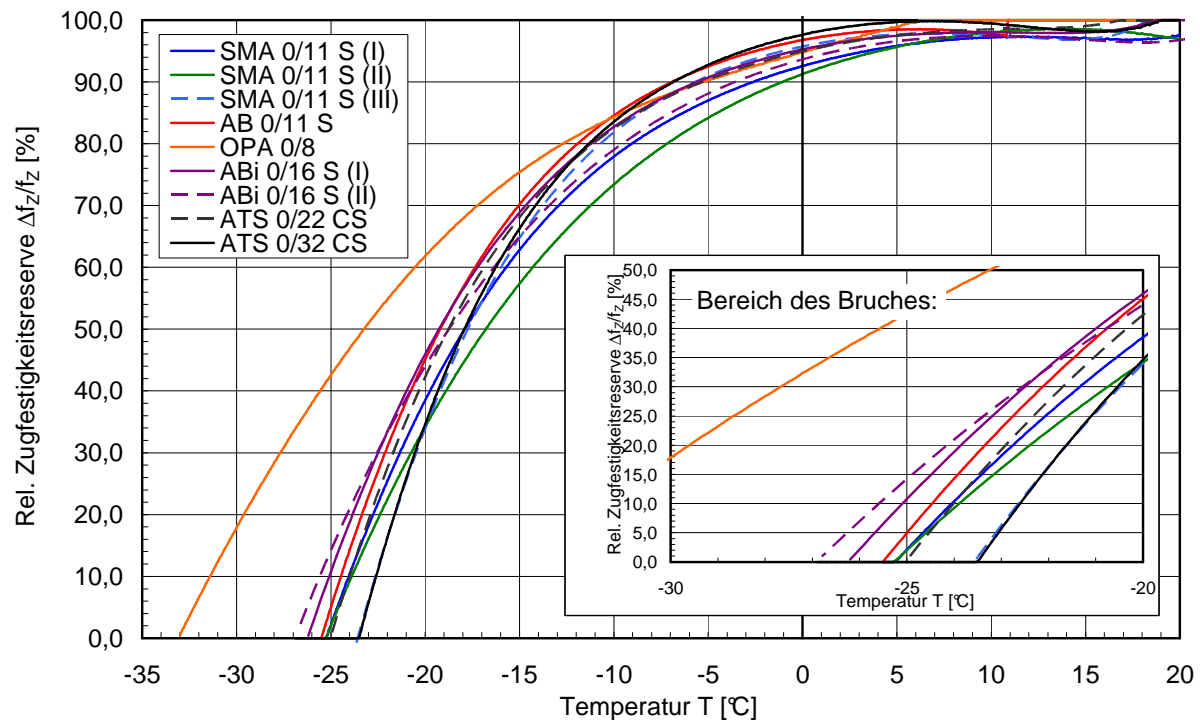


Abbildung 3-5: Prozentualer Anteil der Zugfestigkeitsreserve an der Zugfestigkeit aller untersuchten Asphalte in Abhängigkeit von der Temperatur

Tabelle 3.3: Als Unterspannung in Zug-Schwellversuchen angesetzte kryogene Spannungen $\sigma_u(T)$ [MPa]

Asphalt	Temperatur T [°C]				
	-15	-10	-5	0	+5
SMA 0/11 S (I)	1,486	0,845	0,444	0,215	0,106
SMA 0/11 S (II)	1,906	1,153	0,626	0,288	0,099
AB 0/11 S	2,246	1,171	0,515	-	0,056
OPA 0/8	0,307	0,173	0,094	0,050	0,030
ABi 0/16 S (I)	1,498	0,831	0,416	0,187	0,078
ATS 0/32 CS	1,134	0,568	0,222	0,094	0,058

3.3 Retardationsversuch

Beim Retardationsversuch wird ein Probekörper, nachdem er spannungsfrei temperiert wurde, für eine Zeitdauer von 8 Stunden mit einer konstanten Zugspannung belastet. Während der Belastungsphase wird die Verformung des Probekörpers aufgezeichnet. Nach der Belastungsphase wird die Spannung zurückgefahren und die Rückverformung während einer Zeitdauer von weiteren zwei Stunden erfasst.

Ergebnis des Retardationsversuchs ist der sich infolge der konstanten Zugspannung einstellende Dehnungsverlauf, die so genannte Kriechkurve $\varepsilon(t)$.

Die während der Belastung gemessenen Dehnungen lassen sich mit hoher Genauigkeit mit Hilfe des Burgers-Modells beschreiben. Dadurch können aus jeder Prüfung die rheologischen Stoffkenngrößen E_1 , E_2 , λ_1 , und λ_2 ermittelt werden [6]. Nach [33] führen Vereinfachungen der rheologischen Modellbeschreibung durch die Nutzung des Maxwell-Modells oder durch die Gleichsetzung der Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 sowie der Viskositäten λ_1 und λ_2 des Burgers-Modells zu geringeren Anpassungsqualitäten ohne den Rechenaufwand zu verringern. Daher wird bei der Auswertung der Retardationsversuche das Burgers-Modell mit vier unabhängigen Parametern verwendet.

Die durch Retardationsversuche für die untersuchten Asphalte ermittelten Materialparameter werden in Kapitel 6.2 zusammengestellt und deren Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen ausgewertet. In den Kapiteln 6.3 und 6.4 werden die rheologischen Kenngrößen zur Berechnung der akkumulierten bleibenden Dehnung der Zug-Schwellversuche verwendet.

3.4 Zug-Schwellversuch

3.4.1 Beschreibung des Prüfverfahrens

Abbildung 3-6 zeigt die für die Durchführung der Zug-Schwellversuche verwendete hydraulisch angetriebene Prüfmaschine. Es können last- und/oder weggeregelte Versuche mit Sinus- oder rechteckförmigen Last- bzw. Wegimpulsen durchgeführt werden. Die Prüfmaschine kann im elektrisch-hydraulischen Betrieb Kräfte bis zu 20 kN auf einen Probekörper aufbringen. Die Temperierkammer, in die die Versuchseinrichtung eingebaut ist, ermöglicht Prüftemperaturen zwischen -30°C und $+50^\circ\text{C}$ [31].

Auf einem Unterschrank mit formstabiler Arbeitsplatte stehen senkrecht zwei zylindrische Säulen, an denen eine in der Höhe verstellbare, biegesteife Traverse befestigt ist. Die Traverse trägt den Hydropulszylinder, der mit Hilfe eines Servovenils die Zug-Schwell-Kräfte generiert. Der sehr hohe, für die Generierung schnell veränderlicher Kräfte benötigte Öldruck wird separat in einem Hydraulikaggregat erzeugt und über das PID-geregelte Servoventil gesteuert. Zwischen Hydropulszylinder und dem Probekörper befindet sich die zur Aufnahme der tatsächlich aufgebrachten Belastungen benötigte Kraftmessdose. Die Halterungen zur Aufnahme des

Probekörpers und zwei induktive Wegaufnehmer für die Verformungsmessung befinden sich innerhalb des zwischen den Säulen der Prüfmaschine eingebauten Klimaschranks, der die gewünschte Versuchstemperatur während der Prüfung konstant hält ($\Delta T = \pm 0,3 \text{ K}$). In die Prüfeinrichtung integriert ist die Messwerterfassung und -verarbeitung, die eine Auswertung der Versuche hinsichtlich der ertragenen Lastwechselzahl bis zum Bruch des Probekörpers sowie des Verlaufs der akkumulierten bleibenden sowie der elastischen Dehnungen während des Versuchs erlaubt. Durch die vorgenommene Messdatenreduktion kann allerdings der Dehnungsverlauf eines einzelnen Lastwechsels nicht untersucht werden. Daher werden die Daten der Kraft- und Wegmessung zusätzlich elektronisch aufgenommen und mit einem extern arbeitenden Messwerterfassungssystem gespeichert. Dadurch können die Daten der Kraft- und Wegmessung mit Zuordnung des Messzeitpunktes mit einer hohen Messrate erfasst und gespeichert werden. Jede Einzelschwingung wird mit 15 einzelnen Messwerten charakterisiert. Die erweiterte Messdatenerfassung kam bei den Asphaltvarianten SMA 0/11 S (I), SMA 0/11 S (III), ABi 0/16 S (II) sowie ATS 0/22 CS nicht zur Anwendung.

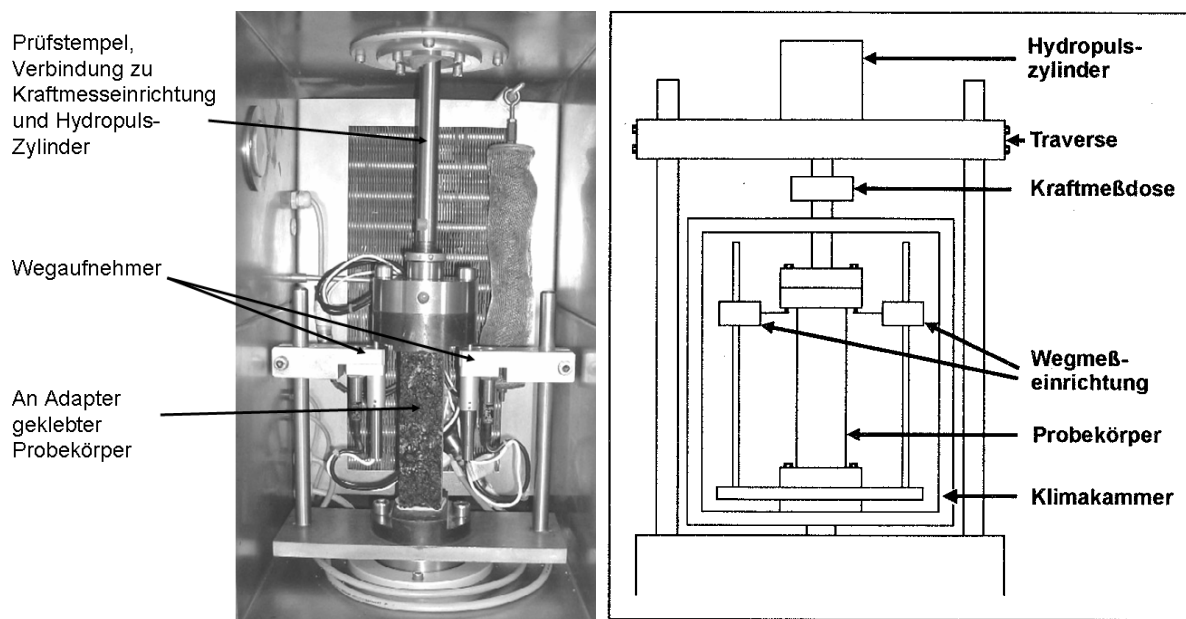


Abbildung 3-6: Foto und Prinzipskizze der Prüfeinrichtung zur Durchführung der Zug-Schwellversuche [31]

Beim Zug-Schwellversuch wird ein prismatischer Probekörper in Längsrichtung mit einer sinusförmigen Zugspannung belastet. Dabei werden die Prüftemperatur, die Prüffrequenz sowie die Spannung variiert. Als Unterspannung wird die im Abkühlver-

Die Probekörperabmessungen entsprechen den in Tabelle 3.2 aufgeführten Werten der Prüfkörper für die Untersuchungen des Verhaltens bei tiefen Temperaturen. In einer Klebebank wird der Probekörper an Adapter geklebt. Nach Aushärtung des Klebers werden die Probekörper ausgemessen und die Probekörper in die Prüfmaschine eingebaut. Der untere Adapter wird mit der Grundplatte, der obere mit dem Prüfstempel verschraubt.

Spannung σ [Mpa]

Oberspannung σ_o

Mittlere Spannung σ_m

Unterspannung σ_u
= kryogene Spannung

Spannungsamplitude σ_a

Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$

Impulsdauer
= 1/Frequenz

Zeit t [s]

Der Probekörper wird so lange belastet, bis er in zwei Teile zerreißt. Während der gesamten Versuchsdauer werden die Signale der Kraft- und Wegmesseinrichtungen kontinuierlich erfasst und nach Versuchsende gespeichert.

3.4.2 Verfahren zur Versuchsauswertung

Zur Auswertung der Kraft- und Wegmessdaten werden Parameter der Sinusfunktionen (Gln. 3.2 und 3.3) mittels Minimierung der Fehlerquadratsumme aus den 15 Messwerten einer einzelnen Schwingung ermittelt.

$$F(t) = F_m + F_a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_F) \quad \text{Gleichung 3.2}$$

mit:

$F(t)$: zeitabhängige, sinusförmige Kraftfunktion [N]

F_m : mittlere Kraft [N]

F_a : Kraftamplitude [N]

φ_F : Phasenverschiebung der Kraftschwingung [rad]

$$s(t) = s_m + s_a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_s) \quad \text{Gleichung 3.3}$$

mit:

$s(t)$: zeitabhängige, sinusförmige Wegfunktion [mm]

s_m : mittlerer Weg [mm]

s_a : Wegamplitude [mm]

φ_s : Phasenverschiebung der Wegschwingung [rad]

Die im Probekörper (PK) auftretende Spannung ergibt sich durch die Division der in ihm wirkenden Kraft F durch seine Querschnittsfläche A_{PK} (Gleichung 3.4).

$$\sigma(t) = \frac{F_m}{A_{PK}} + \frac{F_a}{A_{PK}} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_F) = \sigma_m + \sigma_a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_F) \quad \text{Gleichung 3.4}$$

Durch die Befestigung der Wegaufnehmer an der Grundplatte werden nicht nur die Verformungen des Probekörpers erfasst, sondern zusätzlich die des unteren Adapters und der Befestigungsschrauben. Trotz des im Vergleich zur Asphaltsteifigkeit sehr hohen Elastizitätsmodul der Stahlschrauben ($E_{\text{Stahl}} = 210.000 \text{ MPa}$) müssen die Verformungen der Schrauben berücksichtigt werden, da diese durch die vergleichsweise kleine Querschnittsfläche mit einer hohen Zugspannung beansprucht werden. Die in den Schrauben auftretenden Dehnungen sind rein elastisch und haben demzufolge einen Phasenwinkel von 0° . Um die tatsächlichen Verfor-

mungen des Probekörpers zu ermitteln, müssen die Verformungsanteile der Stahlschrauben von dem gemessenen Wegsignal abgezogen werden.

Dazu kann Gleichung 2.15 unter Verwendung der folgenden Parameter verwendet werden:

$A = s_{m,PK}$ mittlere Verformung des Probekörpers [mm]

$B = s_{a,PK}$ Verformungsamplitude des Probekörpers [mm]

$C = \varphi_{s,PK}$ Phasenverschiebung [°]

$$a = s_{m,Schr} = \varepsilon_{m,Schr} \cdot l_{Schr} = \frac{\sigma_{Schr}}{E_{Stahl}} \cdot l_{Schr} = \frac{F_m}{E_{Stahl} \cdot A_{Schr}} \cdot l_{Schr}$$

$$b = s_{a,Schr} = \varepsilon_{a,Schr} \cdot l_{Schr} = \frac{\sigma_{Schr}}{E_{Stahl}} \cdot l_{Schr} = \frac{F_a}{E_{Stahl} \cdot A_{Schr}} \cdot l_{Schr}$$

$$c = \varphi_{s,Schr} = 0^\circ$$

mit: l_{Schr} relevante Länge der Verbindungsschrauben [mm]

A_{Schr} Querschnittsfläche der Verbindungsschrauben [mm²]

$s_{m,Schr}$ mittlere Verformung der Verbindungsschrauben

$s_{a,Schr}$ Verformungsamplitude der Verbindungsschrauben

Gleichungen 3.5 bis 3.7 beschreiben die Korrekturberechnung zur Ermittlung der tatsächlichen Probekörperverformungen aus dem ausgewerteten Wegmesssignal.

$$s_{m,PK} = s_m - s_{m,Schr} = s_m - \frac{F_m}{E_{Stahl} \cdot A_{Schr}} \cdot l_{Schr} \quad \text{Gleichung 3.5}$$

$$s_{a,PK} = \sqrt{s_a^2 + s_{a,Schr}^2 - 2 \cdot \cos \varphi_s \cdot s_a \cdot s_{a,Schr}} \quad \text{Gleichung 3.6}$$

$$\varphi_{s,PK} = \arccos \frac{s_a^2 - s_{a,PK}^2 - s_{a,Schr}^2}{2 \cdot s_{a,PK} \cdot s_{a,Schr}} \quad \text{Gleichung 3.7}$$

Aus den korrigierten Wegmessgrößen können für jeden Lastimpuls N die die Asphaltreaktion beschreibenden Stoffkenngrößen

- akkumulierte bleibende Dehnung Gl. 3.8),
- $\varepsilon_{akk,bl}$, elastische Dehnung ε_{el} (Gl. 3.9),
- absoluter E-Modul $|E|$ (Gl. 3.10) und
- Phasenwinkel zwischen Spannungs- und Dehnungssignal φ (Gl. 3.11)

berechnet werden.

$$\varepsilon_{akk,bl} = \varepsilon_m - \varepsilon_a = \frac{s_{m,PK} - s_{a,PK}}{l_{PK}} [-] \quad \text{Gleichung 3.8}$$

$$\varepsilon_{el} = 2 \cdot \varepsilon_a = 2 \cdot \frac{s_{a,PK}}{l_{PK}} [-] \quad \text{Gleichung 3.9}$$

$$|E| = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} [\text{MPa}] \quad \text{Gleichung 3.10}$$

$$\varphi = (\varphi_{s,PK} - \varphi_F) \cdot \frac{180}{\pi} [^\circ] \quad \text{Gleichung 3.11}$$

3.4.3 Versuchsergebnisse

In Abbildung 3-8 ist der Verlauf der akkumulierten bleibenden Dehnung sowie des absoluten E-Moduls während eines Zug-Schwellversuchs exemplarisch dargestellt. Der Verlauf der akkumulierten bleibenden Dehnung kann als dreiphasige Impulskriechkurve interpretiert werden. Der Dehnungszuwachs je Lastwechsel nimmt nach Versuchsbeginn zunächst ab und erreicht dann eine annähernd konstante Phase. Tatsächlich durchläuft die akkumulierte bleibende Dehnung jedoch einen Wendepunkt, und die danach progressiv zunehmende Dehnungsrate zeigt die zunehmende Schädigung des Probekörpers.

Die elastischen Dehnungsanteile und der daraus berechnete absolute E-Modul $|E|$ sind zu Versuchsbeginn bei sehr geringen Spannungen und tiefen Temperaturen einen konstanten Verlauf. Dieser geht nach Durchschreiten einer bestimmten Lastwechselzahl in einen quasi-linear verlaufenden Anstieg der elastischen Dehnung und somit in eine quasi-lineare Abnahme des absoluten E-Moduls über. Bei hohen Prüftemperaturen und hoher Prüfspannung kann kein Bereich mit konstantem

absoluten E-Modul beobachtet werden. Am Ende des Versuchs deutet die dann schneller verlaufende Abnahme des absoluten E-Moduls auf eine fortschreitende Schädigung des Probekörpers hin, die mit dem Bruch endet.

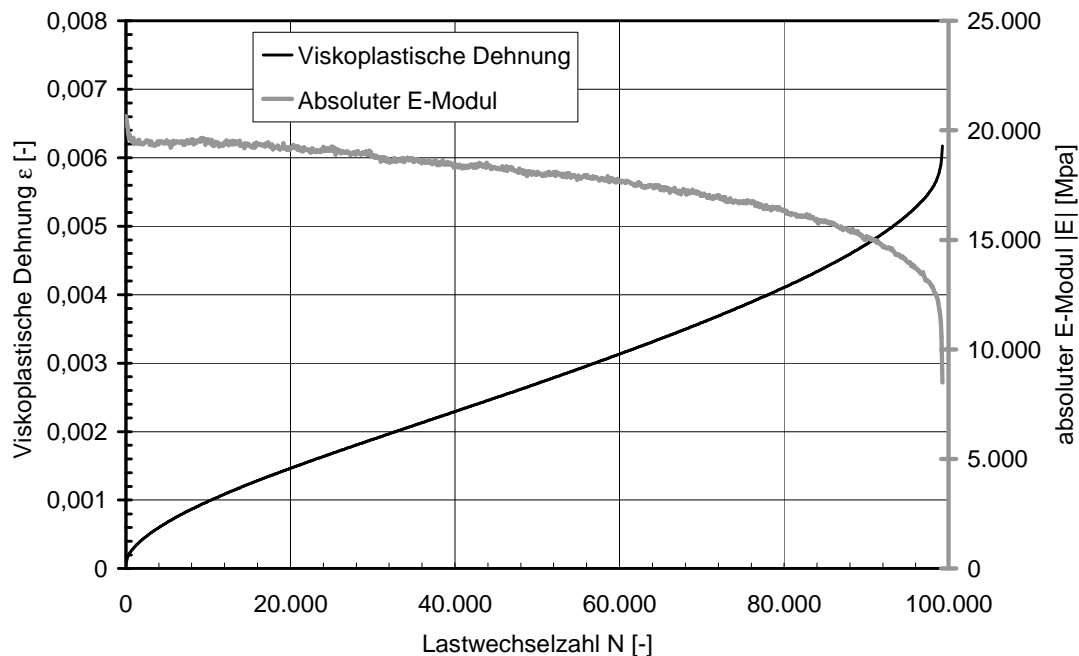


Abbildung 3-8: Exemplarischer Verlauf der akkumulierten bleibenden Dehnung und des absoluten E-Moduls während eines Zug-Schwellversuches

Um das Ermüdungsverhalten verschiedener Asphalte bei unterschiedlichen Prüfbedingungen bewerten zu können, müssen aus den Verläufen der elastischen und der bleibenden Dehnung ermüdungsrelevante Kennwerte bestimmt werden.

In Zug-Schwellversuchen kann mit geringem Aufwand die Lastwechselzahl bestimmt werden, bei der der Probekörper endgültig bricht (Bruchlastwechselzahl N_{Bruch}). Da zu erwarten ist, dass Bruchversagen an der schwächsten Stelle des Probekörpers auftritt, repräsentiert diese Lastwechselzahl nicht zwangsläufig den für die Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens optimalen Kennwert.

Die Ermittlung der Dehnung bezieht der Probekörper in der gesamten Länge ein. Daher repräsentieren die Dehnungsmesswerte eine mittlere Reaktion des gesamten Probekörpers. Durch die Definition eines Ermüdungs-Kennwertes unter Berücksichtigung der gemessenen Dehnung sind einzelne herstellungsbedingte Schwachstellen weniger stark gewichtet. Der Verlauf der elastischen Dehnungsanteile und des daraus berechneten absoluten E-Moduls kann zur Definition von ermüdungsrelevan-

ten Lastwechselzahlen herangezogen werden. Bei geringeren Beanspruchungen im Zug-Schwellversuch (geringe Spannungen bei tiefen Temperaturen) zeigt der Verlauf des absoluten E-Moduls zu Beginn eine konstante Phase. Der Beginn der linearen Abnahme des absoluten E-Moduls kann als Anzeichen der Bildung erster Mikrorisse interpretiert werden, sodass die zugehörige Lastwechselzahl als Mikrorisslastwechselzahl N_{Mikro} bezeichnet wird. Die Neigung der linearen Abnahme des absoluten E-Moduls $\Delta|E|$ kann als Maß der Schädigung je Lastwechsel bestimmt werden.

Zum Vergleich von einaxialen Zug-Schwellversuchen zu anderen Ermüdungsversuchen, bei denen der Bruchzeitpunkt nicht bei allen Prüfbedingungen genau bestimmt werden kann, eignet sich ein Verfahren, das von Hopman [19] entwickelt wurde und auf den Verlauf der dissipierten Energie nach Van Dijk [34] beruht. Das Verfahren wurde an der Universität von Nottingham von Rowe [30] erfolgreich zur Auswertung von Spaltzug-Schwellversuchen angewendet. Die „Energy Ratio“ ER beschreibt das Produkt der Lastwechselzahl N mit dem Verhältnis der am Versuchsanfang je Lastwechsel dissipierten Energie W_0 zur dissipierten Energie W_n eines beliebigen Lastwechsels N (Gl. 3.12). Durch die Annahme einer während des Versuchs konstanten Phasenverschiebung zwischen dem Spannungs- und Dehnungssignal verhält sich die ER proportional zum Produkt aus der Lastwechselzahl N und dem zu diesem Zeitpunkt vorliegenden absoluten Elastizitätsmodul $|E|_n$ (Gl. 3.13).

$$ER(n) = \frac{n \cdot W_0}{W_n} = \frac{n \cdot (\pi \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \sin \varphi_0)}{\pi \cdot \sigma_n \cdot \varepsilon_n \cdot \sin \varphi_n} \quad \text{Gleichung 3.12}$$

$$ER(n) \sim N \cdot |E|_n \quad \text{Gleichung 3.13}$$

In Abbildung 3-9 ist der Verlauf der ER über der Lastwechselzahl dargestellt. Die Lastwechselzahl, bei der ER einen Maximalwert durchschreitet wird als Makrorisslastwechselzahl N_{Makro} definiert. Nach der zugrunde liegenden Schädigungstheorie vereinen sich zu diesem Zeitpunkt Mikrorisse zu einem ersten Makroriss.

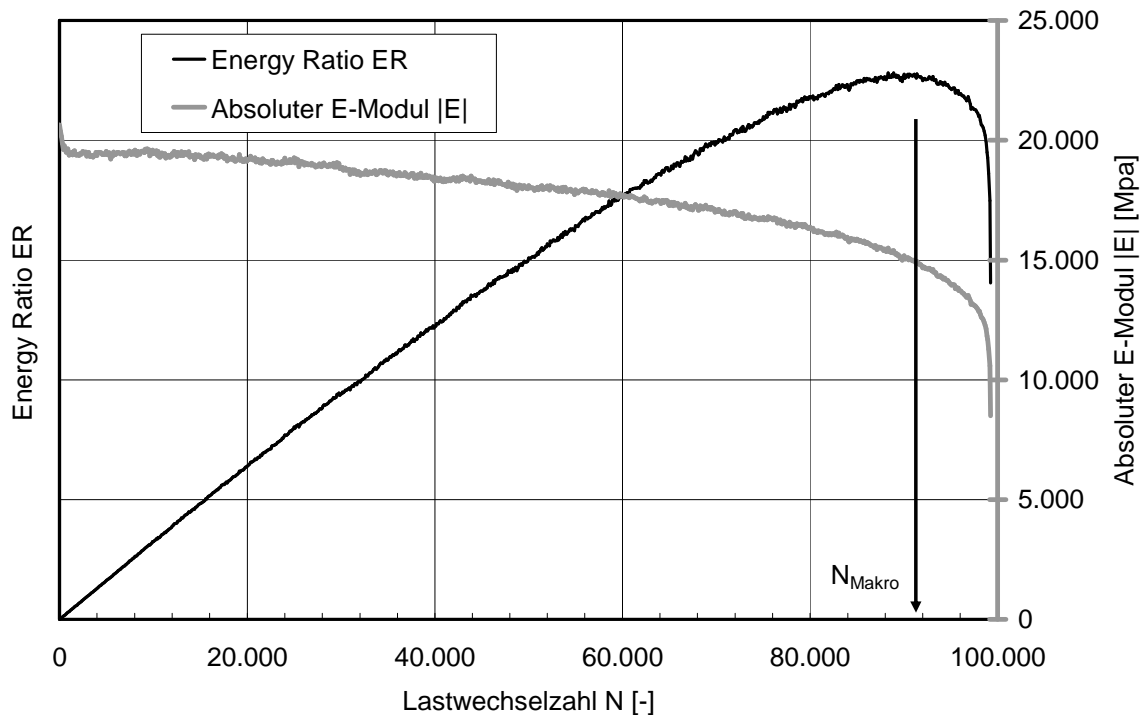


Abbildung 3-9: Ermittlung der bis zum Makroriss ertragbaren Lastwechselzahl N_{Makro} anhand der Energy Ratio ER

In [29] konnte anhand von Splittmastixasphalten mit verschiedenen Bindemitteln festgestellt werden, dass mit abnehmender Temperatur das Auftreten des Makrorisses näher an den Bruchzeitpunkt heranrückt. Während die Anzahl der Lastwechsel bis zum Makroriss bei einer Temperatur von $+5^{\circ}\text{C}$ zwischen 87% und 91 % der Bruchlastwechselzahl betrug, vergrößerte sich dieser Anteil bei -10°C auf Werte zwischen 93% und 98%.

Neben dem Verlauf der elastischen Dehnungsanteile kann auch der Verlauf der akkumulierten bleibenden Dehnung zur Bestimmung ermüdungsrelevanter Lastwechselzahlen herangezogen werden. In [24] wurde die Lastwechselzahl, bei der ein Wendepunkt in der Impulskriechkurve beobachtet werden kann, mit unterschiedlichen Methoden bestimmt. Als Ergebnis wurde erkannt, dass die Anwendung der unterschiedlich ermittelten ermüdungsrelevanten Lastwechselzahlen - ermittelt aus dem Verlauf der akkumulierten bleibenden Dehnung und der elastischen Dehnung - zu den qualitativ gleichen Aussagen führte, wobei bei Verwendung der Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} und der Makrorisswechselzahl N_{Makro} die geringsten Streuungen der Messwerte erreicht wurden.

Daher werden folgende Ergebnisse eines jeden Zug-Schwellversuchs ausgewertet und dokumentiert:

- die bis zum Zerbrechen in zwei Teile ertragene Bruchlastwechselzahl N_{Bruch} ,
- die bis zum Makroriss ertragene Lastwechselzahl N_{Makro} ,
- die jeweils beim 100. Lastwechsel gemessene elastische Dehnung $\varepsilon_{\text{el},100}$ und
- die Steifigkeitsgrößen $|E|_{100}$ und ϕ_{100} sowie
- die Abnahme des absoluten E-Moduls je Lastwechsel innerhalb der praktisch linearen Phase $\Delta|E|$.

Weiterhin werden die Verläufe

- der akkumulierten bleibenden Dehnung $\varepsilon_{\text{akk,bl}}(N)$ und
- des absoluten E-Moduls $|E|(N)$

erfasst und ausgewertet.

3.4.4 Nutzung der Versuchsergebnisse für die Dimensionierung

Zur Beschreibung der Ermüdungseigenschaften eines Materials eignen sich Ermüdungsfunktionen oder Wöhler-Linien, in denen die in der Ermüdungsprüfung ertragene Lastwechselzahl N der auf den Probekörper wirkenden Beanspruchung gegenüber gestellt wird. Bereits 1959 veröffentlichten Saal und Pell Ergebnisse von Ermüdungsversuchen an Bitumen und Asphalt und beschrieben den Zusammenhang zwischen den Beanspruchungsgrößen Spannung oder Dehnung und der ertragenen Lastwechselzahl in Form einer Potenz-Funktion [32]. In [24] wurde dieser mathematische Zusammenhang zur Auswertung von einaxialen Zug-Schwellversuchen eingesetzt. Der Zusammenhang zwischen der ertragbaren Lastwechselzahl kann dabei sowohl in Abhängigkeit von der aufgetragenen Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ (spannungsabhängige Ermüdungsfunktion, Gl. 3.14) als auch von der elastischen Dehnung $\varepsilon_{\text{el},100}$, die diese Spannungsdifferenz am Versuchsbeginn (100. Lastwechsel) bewirkt (dehnungsabhängige Ermüdungsfunktion, Gl. 3.15) in Form von Potenz-Funktionen beschrieben werden.

$$N_{\text{Makro}} = C_1 \cdot \varepsilon_{\text{el},100}^{C_2} \quad \text{Gleichung 3.14}$$

$$N_{\text{Makro}} = K_1 \cdot \Delta\sigma^{K_2} \quad \text{Gleichung 3.15}$$

Die spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen (Gleichung 3.15) eignen sich gut, um die Temperaturabhängigkeit des Ermüdungsverhaltens darzustellen [23]. Abbildung 3-10 zeigt die in Abhängigkeit von der Temperatur T und der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ ertragbare Lastwechselzahl N von drei verschiedenen Asphalten.

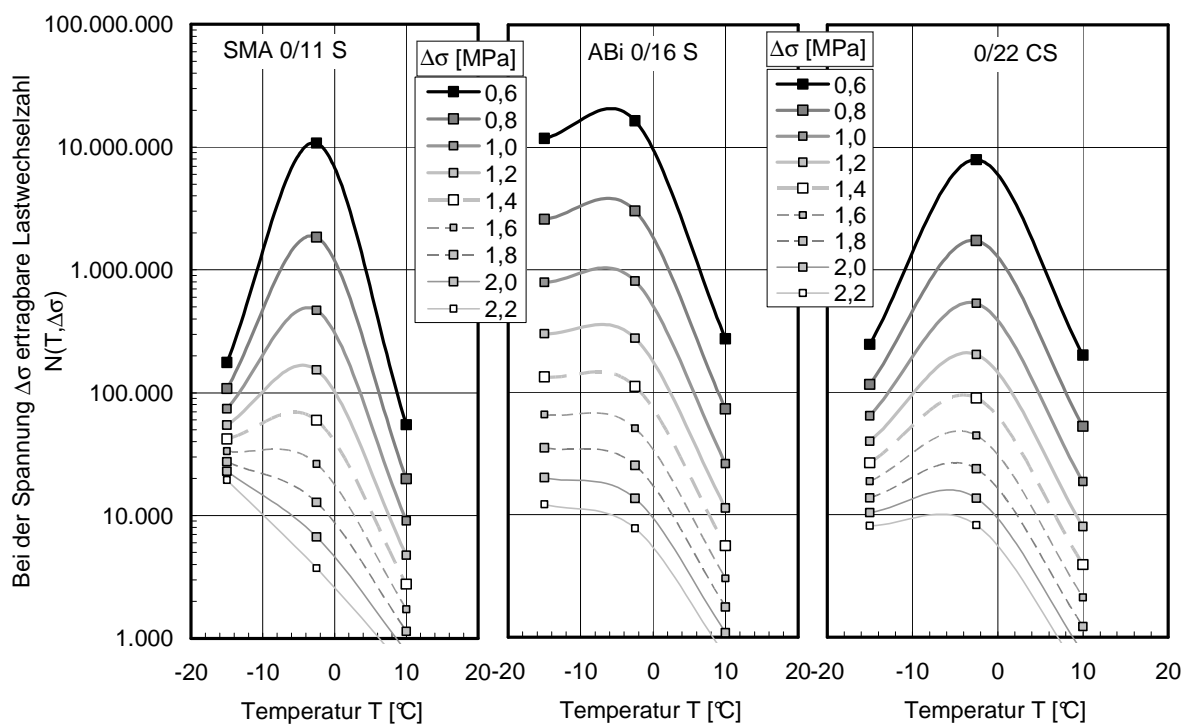


Abbildung 3-10: Anwendung der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen zur Ermittlung der bis zur Makrorissbildung N_{Makro} ertragbaren Lastwechselzahl in Abhängigkeit von der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ [23]

Der in einem Zug-Schwellversuch zu beobachtende Verlauf der akkumulierten bleibenden Dehnung hängt im hohen Maße vom Hohlraumgehalt des geprüften Probekörpers ab. Daher wird jede Belastungsstufe nach Möglichkeit mit drei Einzelversuchen belegt. Die Auswahl der Probekörper erfolgt dabei unter Berücksichtigung ihrer Raumdichten.

Für die Ermittlung der Ermüdungsfunktionen werden die Ergebnisse jedes einzelnen Zug-Schwellversuchs ohne vorherige Mittelwertbildung berücksichtigt.

Um repräsentative Verläufe der akkumulierten bleibenden Dehnung sowie des E-Moduls zu erhalten werden die Verläufe der mehrfach belegten Zug-Schwellversuche, die bei gleichen Belastungsbedingungen durchgeführt wurden, gemittelt. Da diese Versuche unterschiedlich hohe Lastwechselzahlen aufweisen, wird das in [24] näher beschriebene Verfahren zur Ermittlung normiert gemittelter Verläufe angewendet.

3.4.5 Versuchsübersicht

Die angewendeten Prüfbedingungen der Zug-Schwellversuche sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst. Die Beträge der Belastungsstufen wurden in Abhängigkeit von der Temperatur ausgewählt und können den Ergebnistabellen in Anlage 2 entnommen werden.

Tabelle 3.4: Prüfbedingungen in den Zug-Schwellversuchen

Asphalt	Prüftemperaturen T [°C]	Prüffrequenzen F [Hz]	Anzahl der Be- lastungsstufen	Bele- gung
SMA 0/11 S (I)	-15, -5, 0, +5	10, 5, 3	3	3
SMA 0/11 S (II)	-15, -10, -5, 0, +5	10	1	3
SMA 0/11 S (III)	-15; -2,5; +10	10	3	3
AB 0/11S	-15, -10, -5, +5	10, 5, 3	3	3
OPA 0/8	-15, -10, -5, 0, +5	10 (3)	1 (3)	3
ABi 0/16 S (I)	-15, -10, -5, 0, +5	10, 3	3	3
ABi 0/16 S (II)	-15; -2,5; +10	10	3	3
ATS 0/22 CS	-15; -2,5; +10	10	3	3
ATS 0/32 CS	-15, -10, -5, 0, +5	10	3	3

Die in den Zug-Schwellversuchen ermittelten Messdaten ermöglichen die in den folgenden Kapiteln durchgeführte Interpretation der Materialermüdung hinsichtlich:

- Rissbildung (Kapitel 4)
- Steifigkeitsabnahme (Kapitel 5) und
- Akkumulierter bleibender Dehnung (Kapitel 6).

4 Auswirkungen der Materialermüdung: Risswachstum und Bruch

4.1 Ergebnisse der Zug-Schwellversuche

In Anlage 2 sind zu jedem der im Rahmen des in [35] veröffentlichten Forschungsvorhabens durchgeführten Zug-Schwellversuche die Ergebnisse N_{Makro} , N_{Bruch} , $\epsilon_{\text{el},100}$, $|E|_{100}$, ϕ_{100} und $\Delta|E|$ mit Angabe des Hohlraumgehaltes H_{bit} des geprüften Probekörpers sowie die in der dynamischen Prüfung tatsächlich aufgebrachten Unterspannung σ_u und Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ zusammengestellt. Die Ergebnisse für die Asphaltvarianten SMA 0/11 S (III), ABi 0/16 S (II) und ATS 0/22 CS wurden in [24] ausführlich dokumentiert.

Für die Prognose der Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen im Rahmen der Dimensionierung werden funktionale Zusammenhänge benötigt, die die Berechnung der bis zum Eintreten eines Risses ertragbaren Lastwechselzahl erlauben. Die die Rissbildung maßgeblich bestimmende Einflussgröße ist neben der Temperatur und Frequenz die Höhe der mechanischen Beanspruchung.

4.2 Einfluss der Beanspruchung auf die ertragbare Lastwechselzahl

Abbildung 4-1 zeigt exemplarisch die aus den Ergebnissen der Zug-Schwellversuche am Asphaltbeton AB 0/11 S bei -10°C und den drei untersuchten Frequenzen 3 Hz, 5 Hz und 10 Hz ermittelten spannungs- und dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen (Gln. 2.26 und 2.27). In Tabelle 4.1 sind die Regressionsparameter C_1 , C_2 , K_1 und K_2 aller in [35] und [24] ermittelten Ermüdungsfunktionen mit Angabe der Bestimmtheitsmaße R^2 zusammengefasst. Die Parameter der in [24] veröffentlichten Ermüdungsfunktionen weichen von den hier genannten ab, da sie durch Umformen aus Wöhler-Linien berechnet und nicht direkt durch Anpassung an die Ergebnisse ermittelt wurden.

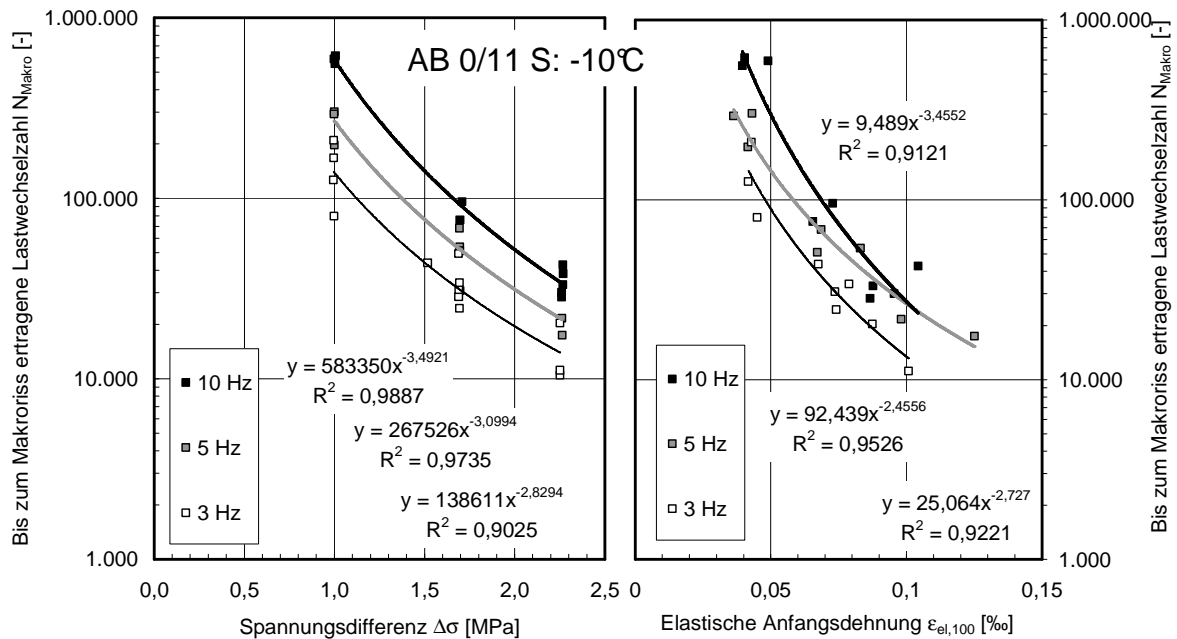


Abbildung 4-1: Spannungsabhängige und dehnungsabhängige Ermüdungsfunktionen der Zug-Schwellversuche am AB 0/11 S bei -10°C

In der Regel erreichen sowohl die spannungs- als auch die dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen Bestimmtheitsmaße von über 80 %. Mit Abnahme der Temperatur ist jedoch vor allem bei den dehnungsabhängigen Funktionen ein Rückgang der Anpassungsqualität zu erkennen. Dies ist zum einen darauf zurück zu führen, dass sich die gemessenen elastischen Dehnungsanteile bei tiefen Temperaturen dem Bereich der Messtoleranzen der Wegaufnehmer nähern. Zum anderen ist anhand der Bilder der Bruchflächen (vgl. Abbildung 4-2) zu erkennen, dass bei tiefen Temperaturen auch Risse durch die Gesteinskörner auftreten, während beim Bruch bei höheren Temperaturen fast ausschließlich der Asphaltmörtel versagt, der in der Regel durch eine hohe Homogenität geprägt ist. Da die Gesteinskörner Schwachstellen aufweisen können, gewinnen die dadurch verursachten Inhomogenitäten vor allem bei tiefen Temperaturen an Bedeutung und bewirken größere Streuungen der Messergebnisse.

Tabelle 4.1: Parameter K_1 , K_2 , C_1 , C_2 der spannungs- und dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen mit Angabe der erreichten Bestimmtheitsmaße R^2

Asphalt- variante	Tem- peratur T [°C]	Fre- quenz f [Hz]	Spannungsabhängige Ermüdungsfunk- tion $N_{\text{Makro}} = K_1 \cdot \Delta \sigma^{K_2}$			Dehnungsabhängige Ermüdungsfunktion $N_{\text{Makro}} = C_1 \cdot \varepsilon_{\text{el},100}^{C_2}$		
			K_1	K_2	R^2 [%]	C_1	C_2	R^2 [%]
SMA 0/11 S (I)	+5	10	59.229	-3,6183	94,8	2,2403	-4,0160	96,6
		5	38.719	-3,7196	93,0	4,5503	-3,6812	97,9
		3	15.634	-3,6873	66,5	14,851	-2,9393	69,6
	0	10	196.201	-4,4036	90,7	1,4238	-4,2988	90,6
		5	93.932	-5,3858	78,2	0,0796	-5,1555	85,7
		3	79.742	-5,9993	87,4	0,0393	-5,4826	90,3
	-5	10	374.499	-4,3311	96,4	8,7517	-3,6337	98,8
		5	181.839	-4,976	83,8	0,4272	-4,4721	83,7
		3	95.586	-4,2018	84,6	0,8067	-4,1262	93,2
	-15	10	291.378	-3,9261	91,9	1,6272	-3,8914	93,9
		5	152.940	-4,0571	85,7	0,7378	-3,9462	79,5
		3	77.862	-3,7697	75,3	1,0886	-3,655	83,9
SMA 0/11 S (II)	+5	10	96.354	-3,9400	94,1	35,551	-3,041	86,0
	-5	10	202.326	-3,8942	87,5	6,2817	-3,616	77,6
SMA 0/11 S (III)	+10	10	9.056,5	-3,5293	79,2	2,5147	-3,6529	84,2
	-2,5	10	469.660	-6,1338	84,0	0,113	-5,4712	89,8
	-15	10	72.706	-1,6577	12,8	0,0126	-5,8196	83,0
AB 0/11 S	+5	10	168.316	-4,9320	94,8	0,5203	-4,6379	91,5
		5	75.194	-4,2152	86,8	1,7387	-3,9775	92,7
		3	54.046	-4,5683	98,8	2,1637	-3,9035	98,8
	-5	10	519.876	-3,8255	99,0	8,9267	-3,5956	95,5
		5	247.776	-3,6855	92,0	16,841	-3,1459	90,7
		3	138.696	-2,8695	93,2	5,7498	-3,3228	94,1
	-10	10	583.350	-3,4921	98,9	9,4890	-3,4552	91,2
		5	267.526	-3,0994	97,4	92,439	-2,4556	95,3
		3	138.611	-2,8294	90,3	25,064	-2,727	92,2
	-15	10	133.846	-2,8083	82,0	33,958	-2,5280	75,2
		5	108.502	-3,8150	84,6	0,8994	-3,5369	76,7
		3	42.266	-2,2500	86,0	66,693	-1,9867	82,4
OPA 0/8	+5	10	364,58	-3,2560	94,4	10,49	-2,9918	98,2
		3	75,54	-3,4479	91,7	10,947	-2,7925	98,1
	0	10	570,8	-4,5582	93,1	2,2577	-3,7705	95,6
		3	2.064,3	-4,6551	92,8	12,664	-2,8678	75,4
ABi 0/16 S (I)	+5	10	115.713	-4,6606	89,2	0,7288	-4,3678	94,8
		3	34.703	-4,8294	91,9	0,8060	-4,1229	95,2
		10	402.106	-5,4266	89,0	0,8158	-4,5991	80,7
	0	3	69.315	-4,3447	74,8	0,4535	-4,5420	80,5
		10	469.607	-4,4152	87,3	1,6826	-3,9089	89,7
		3	120.906	-4,3076	88,4	0,6527	-4,1664	91,1
	-5	10	692.869	-4,4744	88,8	51,317	-2,9201	84,1
		3	175.308	-4,7896	85,5	0,3980	-4,3625	97,5
		10	308.891	-3,4260	66,8	22,567	-2,9554	55,7
	-15	3	184.948	-4,1822	92,1	2,6886	-3,6269	88,7
		10	26.139	-4,5915	79,2	18,431	-3,1617	93,9
ABi 0/16 S (II)	-2,5	10	808.010	-5,8962	84,8	1,2476	-4,437	93,9
	-15	10	790.782	-5,2957	63,2	1,2952	-4,2009	66,9
ATS 0/22 CS	+10	10	18.682	-4,6453	83,8	7,9575	-3,1837	84,6
	-2,5	10	531.534	-5,2882	84,6	1,6967	-4,0487	89,3
	-15	10	64.267	-2,626	53,3	235,45	-1,577	33,3
ATS 0/32 CS	+5	10	19.292	5,7261	56,5	0,0055	-5,0530	92,1
	0	10	163.262	6,2357	78,5	16,286	-2,5562	51,2
	-5	10	383.705	7,0624	91,6	28,618	-2,2819	64,7
	-10	10	373.249	7,2493	72,0	6,7104	-2,9958	42,3
	-15	10	327.197	5,281	40,1	-	-	-



Abbildung 4-2: Bruchflächen zweier Probekörper (ATS 0/22 CS) nach Zug-Schwellversuchen
links: $T = -15^{\circ}\text{C}$; rechts: $T = +10^{\circ}\text{C}$

4.3 Einfluss der Frequenz / Belastungszeit auf die ertragbare Lastwechselzahl

In Abbildung 4-1 ist zu erkennen, dass mit Zunahme der Frequenz bei gleicher Beanspruchung und Temperatur mehr Lastwechsel bis zum Eintreten des Makrorisses ertragen werden können. Dieses Verhalten kann einheitlich bei allen untersuchten Asphalten und Temperaturen beobachtet werden. Wird nicht die ertragbare Lastwechselzahl, die zum Makroriss führt, in Abhängigkeit von der Beanspruchung aufgetragen, sondern die Zeit, die vom Versuchsbeginn bis zum Auftreten des Makrorisses verstreicht, so lassen sich die im Rahmen dieser Arbeit bei verschiedenen Frequenzen ermittelten Punktpaare durch nahezu gleiche Ermüdungsfunktionen (Gleichungen 4.1 und 4.2) beschreiben (vgl. Abbildung 4-3). Die sich daraus ergebenden Regressionsfunktionen T_1 , T_2 , Z_1 und Z_2 sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

$$t(N_{\text{Makro}}) = T_1 \cdot \Delta\sigma^{T_2} \quad \text{Gleichung 4.1}$$

$$t(N_{\text{Makro}}) = Z_1 \cdot \varepsilon_{\text{el},100}^{Z_2} \quad \text{Gleichung 4.2}$$

Die Ermüdungsfunktionen aller Asphalte und Prüftemperaturen sind in Anlage 3 zusammengestellt.

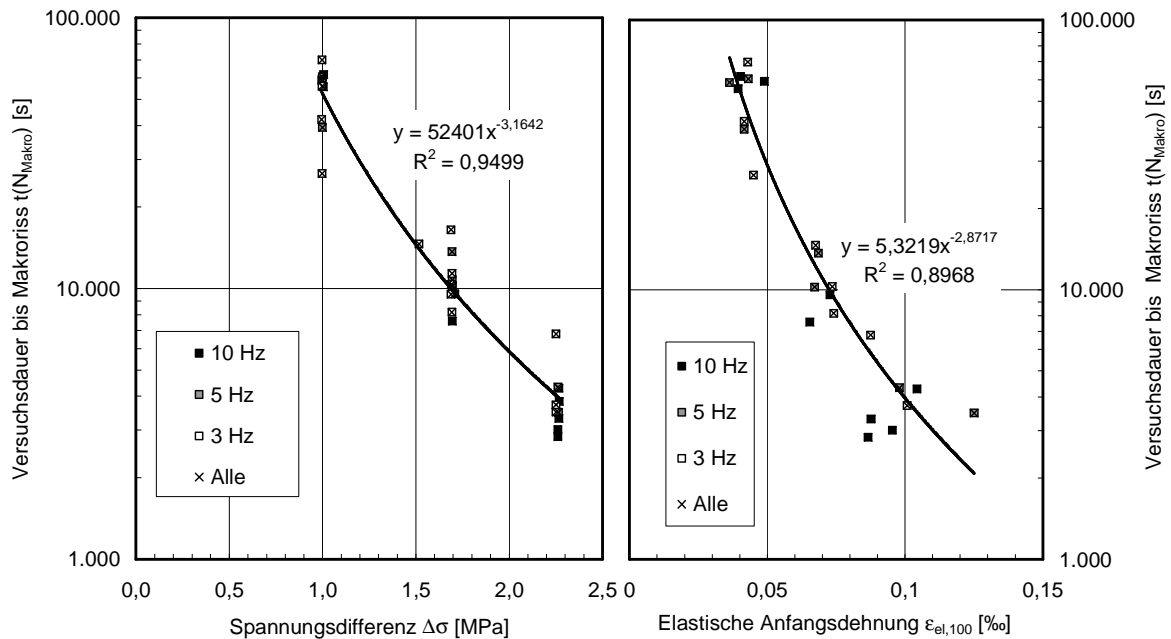


Abbildung 4-3: Versuchsdauern bis zur Makrorissbildung in Zug-Schwellversuchen am AB 0/11 S bei -10°C in Abhängigkeit der Beanspruchung

Bei der Ermittlung von dehnungsabhängigen Zeit-Ermüdungsfunktionen nach Gleichung 4.2 ist zu beachten, dass die elastische Anfangsdehnung eine hohe Frequenzabhängigkeit aufweist. Bei gleicher Temperatur bewirkt eine bestimmte Spannungsdifferenz bei einer Frequenz von 3 Hz eine größere Anfangsdehnung als bei einer Frequenz von 10 Hz. Dadurch erreichen die dehnungsabhängigen Zeit-Ermüdungsfunktionen im Allgemeinen geringere Bestimmtheitsmaße als die spannungsabhängigen Zeit-Ermüdungsfunktionen. Im Folgenden kommen daher die dehnungsabhängigen Zeit-Ermüdungsfunktionen nicht zur weiteren Auswertung.

Die Auswirkung der Belastungsfrequenz auf die anderen Ergebnisse der einaxialen Zug-Schwellversuche – der Verlauf des absoluten E-Moduls und der akkumulierten bleibenden Dehnung – werden in den Kapiteln 5 und 6 untersucht.

Tabelle 4.2: Parameter T_1 , T_2 , Z_1 , Z_2 der spannungs- und dehnungsabhängigen Zeit-Ermüdungsfunktionen mit Angabe der erreichten Bestimmtheitsmaße R^2

Asphalt	Temperatur T [°C]	Spannungsabhängige Ermüdungsfunktion $t(N_{\text{Makro}}) = T_1 \cdot \Delta\sigma^{T_2}$			Dehnungsabhängige Ermüdungsfunktion $t(N_{\text{Makro}}) = Z_1 \cdot \varepsilon_{\text{el},100}^{Z_2}$		
		T_1	T_2	R^2 [%]	Z_1	Z_2	R^2 [%]
SMA 0/11 S (I)	+5	6.137,9	-3,6597	90,8	0,5419	-3,7842	86,1
	0	21.421	-5,2606	82,4	0,0659	-4,6707	80,1
	-5	34.661	-4,4707	86,3	0,2863	-4,0587	89,3
	-15	28.783	-3,9396	84,3	0,2355	-3,7862	83,9
AB 0/11 S	+5	16.478	-4,4749	92,9	1,3197	-3,4815	79,5
	-5	48.785	-3,7888	94,2	1,9299	-3,3286	92,9
	-10	52.401	-3,1642	95,0	5,3219	-2,8717	90,0
	-15	15.547	-2,8609	78,7	4,2388	-2,4942	69,9
OPA 0/8	+5	32,092	-3,3066	93,2	2,9583	-2,7216	91,2
	-10	216,97	-4,5967	91,3	12,939	-2,1108	63,4
ABi 0/16 S	+5	11.574	-4,7455	90,5	0,2054	-4,1013	91,8
	0	30.877	-5,0221	81,5	0,1826	-4,3591	77,3
	-5	44.649	-4,5518	88,6	0,4549	-3,6881	82,3
	-10	63.495	-4,5362	86,1	1,5622	-3,3900	87,0
	-15	45.325	-4,0752	78,2	0,8479	-3,4096	69,2

4.4 Einflüsse auf die Parameter der Ermüdungsfunktionen

In der internationalen Literatur sind die Ergebnisse zahlreicher Feldstudien und Ermüdungsversuche in Form von Ermüdungsfunktionen veröffentlicht. Die dabei ermittelten Koeffizienten K_1 und K_2 hängen im hohen Maße von den jeweiligen Versuchsbedingungen ab. Exemplarisch sind in Abbildung 4-4 die in verschiedenen Studien ermittelten Exponenten von Ermüdungskurven dargestellt. Bei der Zusammenstellung wurde bewusst keine Angabe zu den jeweils angewendeten Versuchsbedingungen und geprüften Asphaltmaterialien gemacht, da in diesen keine kraftgeregelten Zug-Schwellversuche zur Anwendung kamen. Es ist zu erkennen, dass der Exponent der Ermüdungsfunktion Werte zwischen -9 und -2,5 annehmen kann. Die in einem ähnlichen Bereich variierenden Werte der in Tabelle 4.1 zusammengestellten Exponenten K_2 und C_2 können demnach als plausibel eingeschätzt werden.

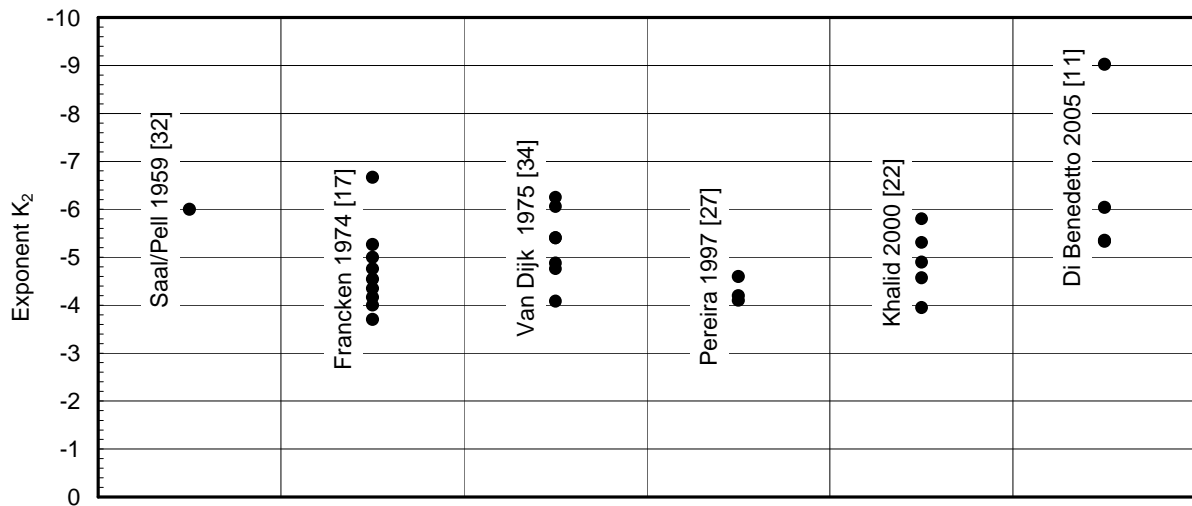


Abbildung 4-4: Exponenten K_2 aus verschiedenen veröffentlichten Studien

Spannungsabhängige Ermüdungsfunktionen bieten die Möglichkeit, die ertragbare Lastwechselzahl anhand der Beanspruchung zu berechnen und eignen sich daher für die Nutzung in Dimensionierungs-Berechnungen. Im Folgenden wird überprüft, welchen weiteren Einflüssen die Parameter der Ermüdungsfunktionen unterlegen sind. Dazu werden die Parameter der bei der Prüffrequenz von $f = 10$ Hz ermittelten Ermüdungsfunktionen weitergehend ausgewertet.

Der Koeffizient K_1 in Gleichung 3.15 entspricht der Lastwechselzahl, bei der durch eine aufgebrachte Spannungsdifferenz von $\Delta\sigma = 1$ MPa ein Makroriss auftritt, da bei diesem Wert der Exponent K_2 das Ergebnis der Gleichung 4.1 nicht beeinflusst. Zur Reduktion des Versuchsaufwandes wurden für einzelne Asphalte bei einigen Temperaturen keine Ermüdungsfunktionen durch Variation der Spannungsdifferenz bestimmt, sondern lediglich Prüfungen mit der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma = 1$ MPa durchgeführt. In Abbildung 4-5 sind die bei $\Delta\sigma = 1$ MPa ermittelten Lastwechselzahlen in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt und mit kubischen Splines verbunden. Da beim OPA 0/8 aufgrund seines hohen Hohlraumgehaltes nur geringere Spannungsdifferenzen aufgebracht werden konnten, sind die ertragbaren Lastwechselzahlen bei $\Delta\sigma = 0,5$ MPa eingetragen. Die in der Regel gute Übereinstimmung der Ermüdungsfunktionskoeffizienten K_1 und der tatsächlich ertragbaren Lastwechselzahlen $N(\Delta\sigma=1,0$ MPa) deuten auf die hohe Anpassungsqualität der Ermüdungsfunktionen hin. Für die in [24] untersuchten Asphalte liegen nur die

Ermüdungskoeffizienten K_1 vor, da die Spannungsdifferenz $\Delta\sigma = 1 \text{ MPa}$ nicht im Prüfprogramm enthalten war.

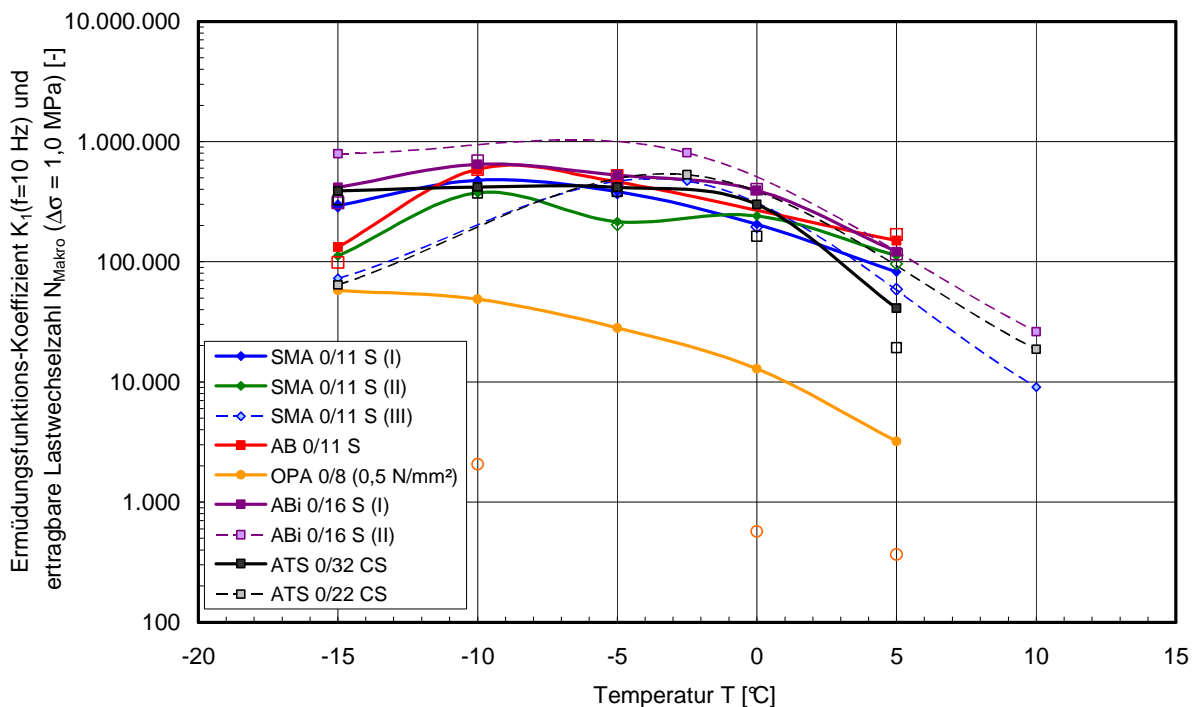


Abbildung 4-5: Koeffizienten K_1 der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen in Abhängigkeit der Temperatur T , ermittelt bei einer Frequenz von $f = 10 \text{ Hz}$

Der Einfluss der Temperatur auf die Koeffizienten K_1 der Ermüdungsfunktionen ist in Abbildung 4-5 zu erkennen: Mit abnehmender Temperatur steigen die Werte des Koeffizienten K_1 zunächst an und durchlaufen bei Temperaturen zwischen -10°C und -5°C einen Maximalwert. Mit weiter sinkender Temperatur nehmen die Werte der Koeffizienten ab. Der Verlauf der Koeffizienten K_1 ähnelt somit dem der Zugfestigkeitsreserve (vgl. Abbildung 3-3). Das Ranking der Asphalte hinsichtlich beider temperaturabhängigen Kenngrößen (Koeffizient K_1 und Zugfestigkeitsreserve Δf_z) zeigt jedoch nur bedingt einen Zusammenhang. So weist der OPA 0/8 in beiden Fällen die kleinsten Werte auf, und die Kenngrößen der ATS 0/22 CS und des ABi 0/16 S (II) erreichen bei einer Temperatur von -5°C in beiden Fällen die höchsten Werte. Während jedoch der AB 0/11 S und der ABi 0/16 S (I) bei der Zugfestigkeitsreserve die höchsten Werte aller Asphalte aufweisen, liegen die Werte der Koeffizienten K_1 beider Asphalte eher im mittleren Bereich.

Die in Abbildung 4-6 dargestellten Werte der Exponenten K_2 zeigen keine signifikante und uneinheitliche Abhängigkeit von der Prüftemperatur T . Während die Beträge der Exponenten der Asphalte AB 0/11 S, ABi 0/16 S (I) eine Abnahme mit sinkender Temperatur aufweisen, zeigen die der Proben SMA 0/11 S (I), SMA 0/11 S (III), ABi 0/16 S (II), ATS 0/32 CS und des OPA 0/8 eine Zunahme. Die Beträge der Exponenten der anderen Asphalte durchlaufen einen Maximalwert.

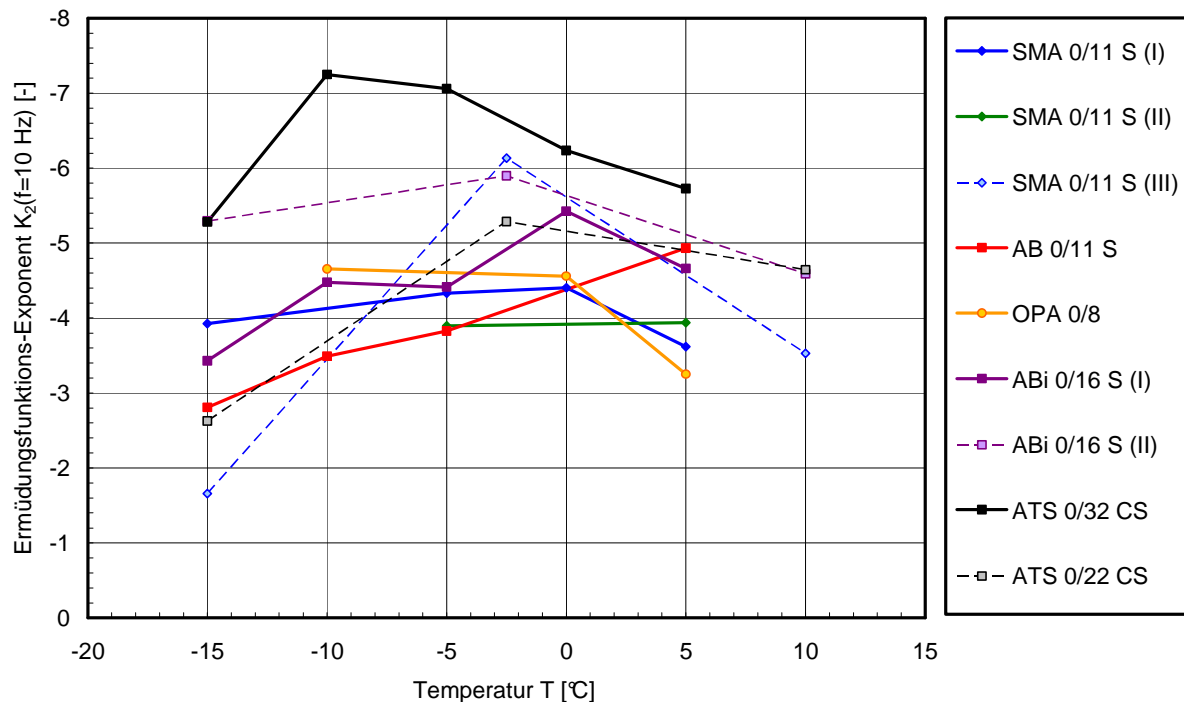


Abbildung 4-6: Exponenten K_2 der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen in Abhängigkeit der Temperatur T , ermittelt bei einer Frequenz von $f = 10$ Hz

Als Interpretationshilfe wurden die von Rubach in [31] veröffentlichten Ergebnisse für verschiedene Asphaltbetone, bei denen die Asphaltzusammensetzung systematisch variiert wurde, herangezogen. Anhand der Ergebnisse wurden Ermüdungsfunktionen ermittelt, mit denen die Bruchlastwechselzahlen in Abhängigkeit von der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ berechnet werden können. Abbildung 4-7 zeigt die Parameter K_1 und K_2 der ermittelten Ermüdungsfunktionen, die an Asphaltbetonen AB 0/11 unter Variation des Bindemittelgehaltes und der Korngrößenverteilung ermittelt wurden.

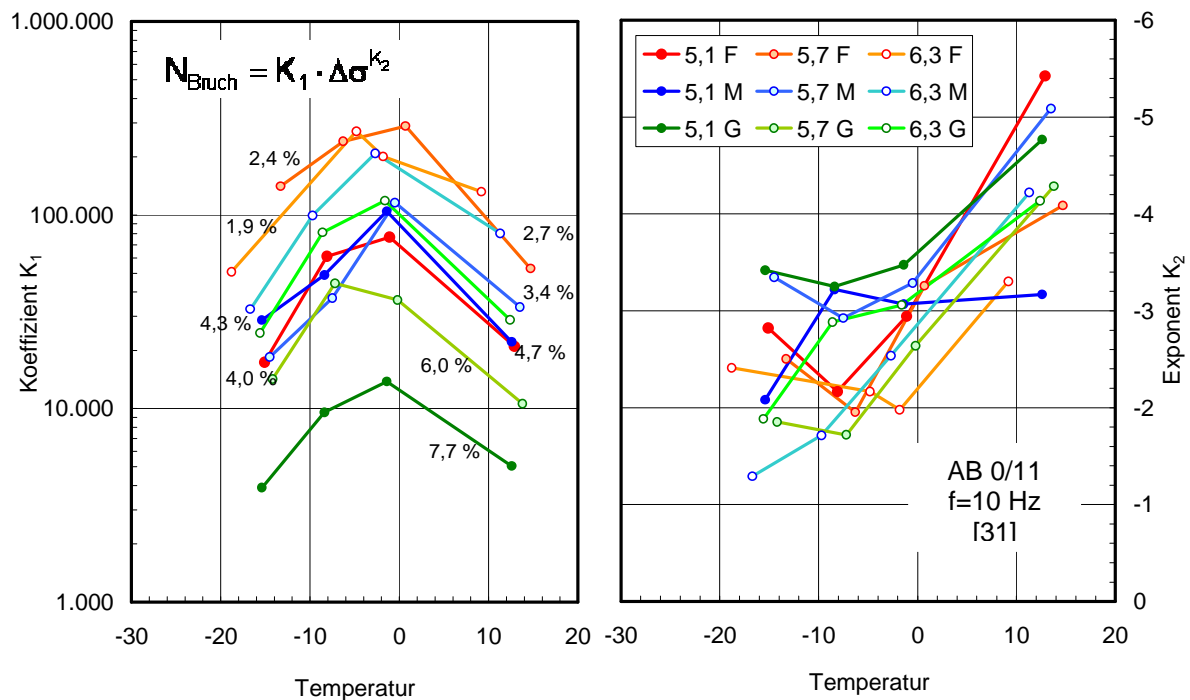


Abbildung 4-7: Koeffizient K_1 und Exponent K_2 verschiedener AB 0/11 unter Variation von Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung (F: Fein, M: Mittel, G: Grob) [31]

Der Koeffizient K_1 weist eine Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung und vom Bindemittelgehalt auf. So erreichen die Varianten mit feiner und mittlerer Zusammensetzung höhere Koeffizienten K_1 als die grob zusammengesetzten Asphaltbetone. Eine Erhöhung des Bindemittelgehaltes führt zu einem Anstieg des Koeffizienten.

In Abbildung 4-7 ist zusätzlich der an den Probekörpern bestimmte mittlere Hohlraumgehalt angegeben. Es zeigt sich, dass der Koeffizienten K_1 und somit die Lastwechselzahl bei einer Beanspruchung mit einer Spannungsdifferenz von $\Delta\sigma = 1,0$ MPa eine deutliche Abhängigkeit vom Hohlraumgehalt des Asphaltes aufweist.

Die Exponenten K_2 weisen einen mit sinkender Temperatur abnehmenden Betrag auf, wobei einige Varianten bei tiefen Temperaturen erneut eine Zunahme zeigen. Die Exponenten der grob zusammengesetzten Asphaltbetone weisen dabei tendenziell höhere Beträge auf als die mit mittlerer und feiner Zusammensetzung. Eine Verringerung des Bindemittelgehaltes von 6,3 % auf 5,1 % bewirkt einen in der Tendenz ansteigenden Betrag des Exponenten K_2 , also eine stärkere Beeinflussung der Bruchlastwechselzahl durch die Spannungsdifferenz.

Den Einfluss der Bindemittelviskosität zeigt Abbildung 4-8. Die Verwendung eines härteren Bindemittels, z.B. B 25 mit einem geringeren Penetrationswert, bewirkt eine Verschiebung des Maximalwertes des Koeffizienten K_1 zu höheren Temperaturen. Beim Exponenten K_2 bewirkt ein härteres Bindemittel eine stärkere Abnahme des Exponenten-Betrages mit sinkender Temperatur. Die Reihung der Absolutwerte der Exponenten macht deutlich, dass sich der Koeffizient K_1 und der Exponent K_2 bei der Bildung der Ermüdungsfunktionen gegenseitig beeinflussen. Dadurch kann die Lage der Exponenten für das Bindemittel B25 zwischen den beiden anderen Bindemitteln geringerer Viskosität erklärt werden.

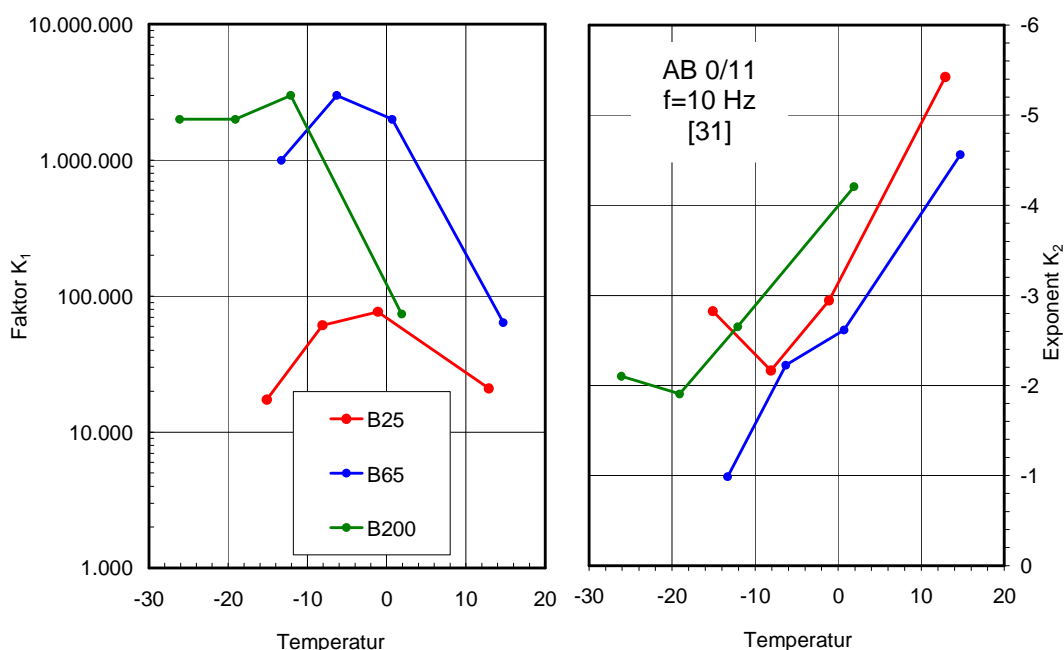


Abbildung 4-8: Koeffizient K_1 und Exponent K_2 verschiedener AB 0/11 unter Variation des Bindemittels [31]

Die bei den Asphaltbetonen in [31] gefundenen Einflüsse aus kompositionellen Merkmalen finden sich auch bei den hier untersuchten Asphalten wieder. So weisen die Asphalte mit hohem Hohlraumgehalt im Allgemeinen ebenfalls höhere Beträge der Exponenten auf und somit eine größere Abhängigkeit der ertragbaren Lastwechselzahl von der Spannungsdifferenz. Die Einflüsse der Bindemittelviskosität werden durch die bei einigen Asphalten verwendeten Polymermodifikationen der Bindemittel überlagert, sodass nur tendenziell ein Zusammenhang zwischen den Erweichungspunkten nach Rückgewinnung und den Temperaturen, bei denen die höchsten Koeffizienten K_1 ermittelt wurden, erkannt werden kann.

4.5 Ermüdungsprognose

Mittels der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen kann die ertragbare Lastwechselzahl bei den verschiedenen Prüftemperaturen für beliebige aus dem Verkehr erzeugte Spannungen (hier: Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma$) und Frequenzen f berechnet werden. Dies kann mit Gleichung 4.3 unter Anwendung der in Tabelle 4.2 zusammengestellten Regressionsfaktoren erfolgen.

$$N_{\text{Makro}} = f \cdot t(N_{\text{Makro}}) = f \cdot T_1 \cdot \Delta\sigma^{T_2} \quad \text{Gleichung 4.3}$$

Exemplarisch ist in Abbildung 4-9 für den AB 0/11 S die bei verschiedenen Spannungsdifferenzen ertragbare Lastwechselzahl in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Zu erkennen ist, dass mit Abnahme der Temperatur die ertragbare Lastwechselzahl bei gleicher Spannungsdifferenz zunächst zunimmt, dann jedoch – nach Durchlaufen eines Maximums – abnimmt. Die bei tiefen Temperaturen kleinere Anzahl der ertragbaren Lastwechsel ist auf die dort zunehmenden kryogenen Spannungen zurückzuführen. In der theoretischen Deutung des Ermüdungsverhaltens bei tiefen Temperaturen versagt das Material bei der im Abkühlversuch ermittelten Bruchtemperatur T_{Br} ohne weitere mechanogene Belastung. Aus diesem Grund sind die Linien der verschiedenen Spannungsdifferenzen unterhalb der tiefsten Prüftemperatur von -15°C weitergeführt und enden bei der Bruchtemperatur T_{Br} bei einem ertragbaren Lastwechsel.

Der grau markierte Bereich zeigt den durch Versuchsergebnissen abgesicherten Spannungsbereich. Zusätzlich sind die Mittelwerte der bei einer Spannungsdifferenz von $\Delta\sigma = 1 \text{ MPa}$ ertragenen Lastwechselzahlen als graue Punkte gekennzeichnet. Die unmittelbare Nachbarschaft mit der Bemessungslinie für $\Delta\sigma = 1,0 \text{ MPa}$ zeigt die gute Qualität des Prognosediagramms.

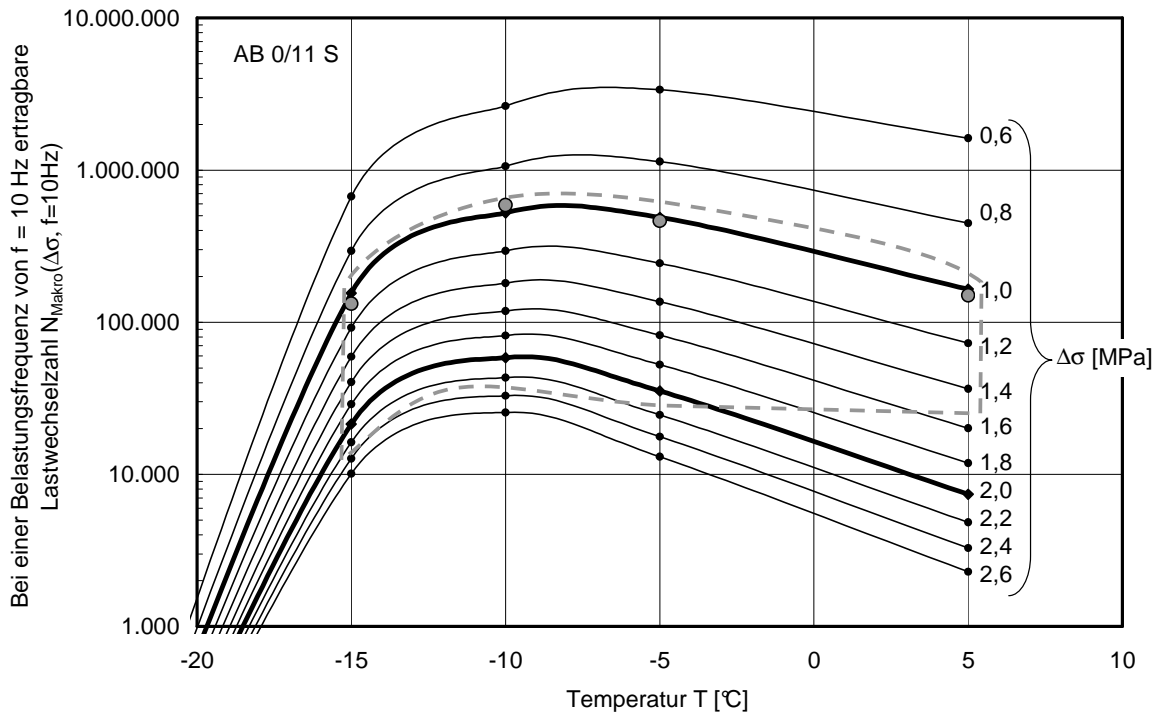


Abbildung 4-9: Anwendung der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen zur Berechnung der ertragbaren Lastwechselzahl für den AB 0/11 S

Auffällig ist die Verschiebung der Temperatur, bei der die ertragbare Lastwechselzahl ein Maximum aufweist. Während dieses Maximum bei geringen Spannungsdifferenzen bei ca. -7°C beobachtet wird, liegt die bei hohen Spannungsdifferenzen maximale ertragbare Lastwechselzahl bei ca. -11°C . Diese Verschiebung kann auch in Abbildung 3-10 beobachtet werden. Ursache hierfür ist der mit Zunahme der Temperatur ansteigende Betrag des Exponenten K_2 (vgl. Abbildung 4.5), der die Spannungsabhängigkeit der ertragbaren Lastwechselzahl beschreibt. Dieser bewirkt, dass sich die Abstände zwischen zwei Dimensionierungslinien gleicher Spannungsdifferenz mit zunehmender Temperatur vergrößern. Dieses Auffächern bewirkt zwangsläufig eine Verschiebung der Temperatur, bei der eine maximale Lastwechselzahl ertragen werden kann.

Die Abbildungen zur Anwendung der Ermüdungsfunktionen der anderen Asphalte sind in Anlage 4 beigelegt.

Zur Überprüfung der Prognosequalität der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen werden die mit Gleichung 3.15 unter Verwendung der Regressionsparameter (Tabelle 4.1) in Abhängigkeit der Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma$ berechnet, die auch in

den Zug-Schwellversuchen zur Anwendung kamen. Die berechneten Lastwechselzahlen werden in Abbildung 4-10 mit den Mittelwerten der Versuchsergebnisse verglichen.

Die Wertepaare lassen sich je Asphalt mit einer Potenzfunktion anpassen. Eine gute Übereinstimmung von den prognostizierten ertragbaren Lastwechseln mit den tatsächlich in den Versuchen erreichten liegt dann vor, wenn der Faktor sowie der Exponent der Potenzfunktion Werte nahe 1,0 annehmen und ein hohes Bestimmtheitsmaß vorliegt. Insgesamt kann die Prognosegenauigkeit als hoch eingeschätzt werden. Die Anzahl der je Asphaltvariante erfassten Vergleichspunkte ergibt sich aus den untersuchten Kombinationen der Belastungsbedingungen Temperatur, Frequenz und Spannungsdifferenz.

Dass sich durch das Zusammenfassen der bei verschiedenen Frequenzen ermittelten Versuchsergebnisse zu Zeit-Ermüdungsfunktionen (Gl. 4.2) keine wesentliche Verschlechterung der Prognosequalität ergibt, zeigt Abbildung 4-11, in der Regressionsgeraden mit vergleichbar guten Bestimmtheits- und Steigungsmaßen ermittelt werden konnten.

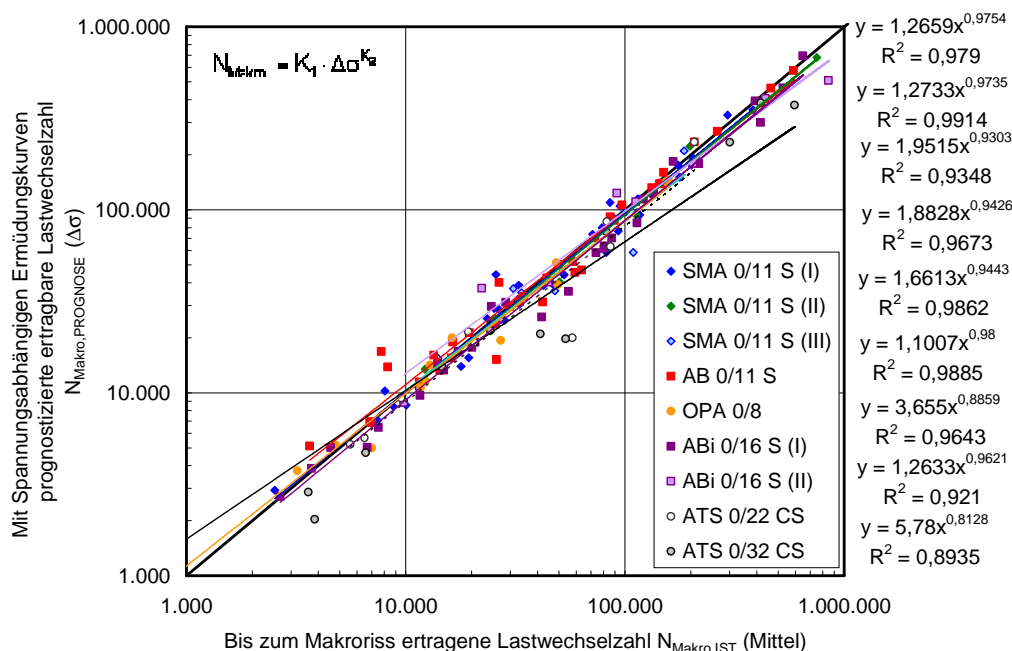


Abbildung 4-10: Vergleich der mittels spannungsabhängiger Ermüdungsfunktionen prognostizierten ertragbaren Lastwechselzahlen mit den tatsächlich in Zug-Schwellversuchen ermittelten Mittelwerten

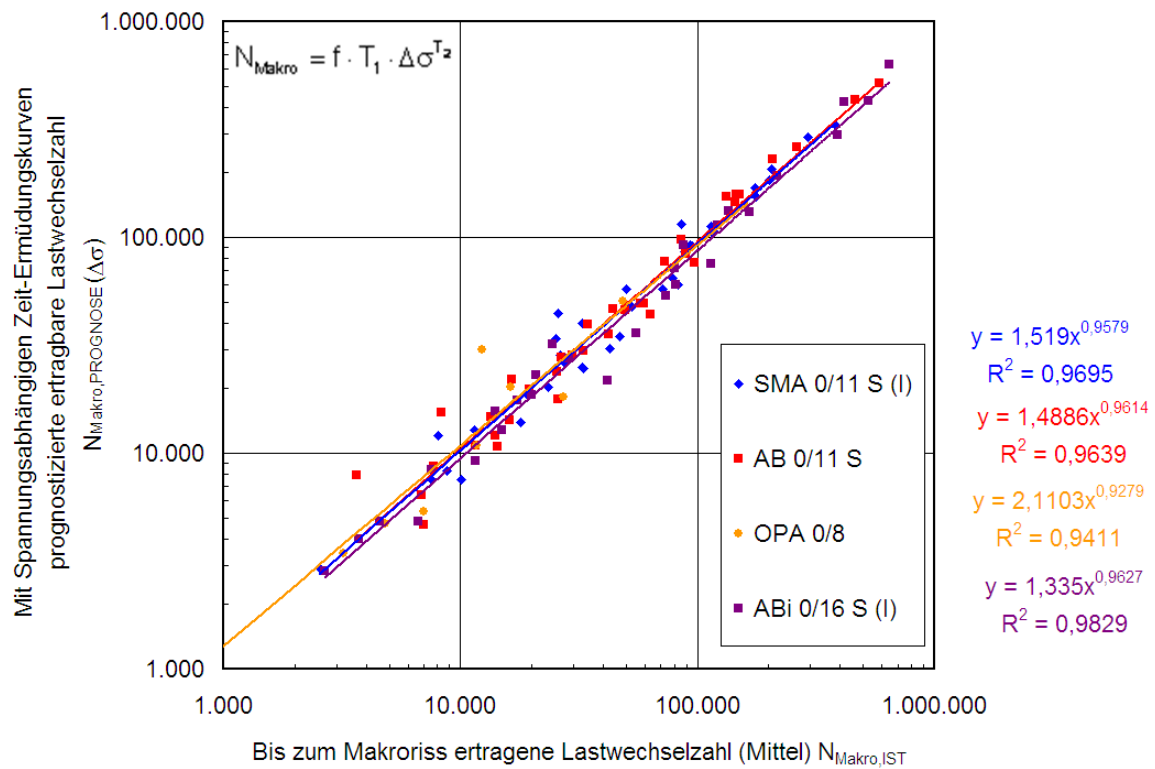


Abbildung 4-11: Vergleich der mittels spannungsabhängiger Zeit-Ermüdungsfunktionen prognostizierten ertragbaren Lastwechselzahlen mit den tatsächlich in Zug-Schwellversuchen ermittelten Mittelwerten

4.6 Reduzierung des Prüfaufwandes

Für die Ermittlung des in Abbildung 4-9 gezeigten Dimensionierungs-Diagramms mussten zahlreiche Zug-Schwellversuche durchgeführt werden. Obwohl der Einfluss verschiedener Prüffrequenzen durch die Bildung von Zeit-Ermüdungsfunktionen erfasst werden kann und somit die Anwendung einer einzigen Prüffrequenz ausreicht, müssen mindestens neun Einzelversuche je untersuchter Temperatur durchgeführt werden (drei Laststufen bei dreifacher Belegung). Da die Temperatur einen entscheidenden Einfluss auf die Ermüdungsresistenz ausübt, sollten Zug-Schwellversuche bei mindestens vier Prüftemperaturen zur Anwendung kommen. Daraus resultieren mindestens 36 Einzelversuche, die eine Prüfzeit von ca. 4 Wochen erfordern. Der in der Regel kurze Zeitraum, in dem Angebote für Baumaßnahmen erstellt werden müssen, erfordert eine Reduzierung des Prüfaufwandes, die jedoch nicht zu einer deutlichen Abnahme der Prognosequalität führen darf.

4.6.1 Prognose mittels dehnungsabhängiger Ermüdungsfunktionen

Für die Anwendung in Dimensionierungsrechnungen können auch dehnungsabhängige Ermüdungsfunktionen (Gleichung 3.14) verwendet werden. Zur Überprüfung der erreichten Prognosequalität wurden in Abbildung 4-12 die Mittelwerte der bei einer bestimmten Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ ertragbaren Lastwechselzahlen den nach Gleichung 3.14 berechneten Lastwechselzahlen gegenübergestellt, wobei als Dehnungsdifferenz $\Delta\varepsilon$ der Mittelwert der elastischen Anfangsdehnungen der entsprechenden Zug-Schwellversuche verwendet wurde. Die Prognosekontrolle zeigt, dass auch die Verwendung dehnungsabhängiger Ermüdungsfunktionen unter Verwendung der in Tabelle 4.1 aufgeführten Ermüdungsfunktions-Parameter zu einer guten Prognosequalität führt.

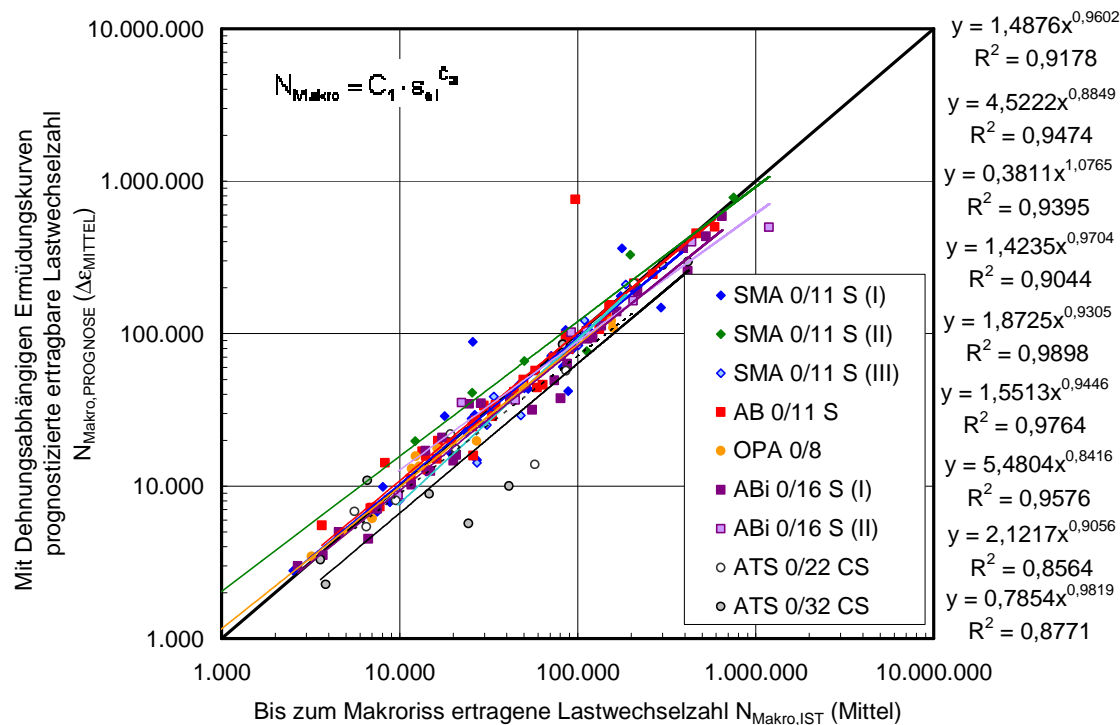


Abbildung 4-12: Vergleich der mittels dehnungsabhängiger Ermüdungsfunktionen prognostizierten ertragbaren Lastwechselzahlen mit den tatsächlich in Zug-Schwellversuchen ermittelten Mittelwerten

Ein von READ [28] für die Auswertung von Spaltzug-Schwellversuchen entwickeltes Konzept sieht vor, eine dehnungsabhängige Ermüdungsfunktion anhand von Versuchsergebnissen zu erstellen, die bei unterschiedlichen Prüftemperaturen ermittelt wurden. Dieser Theorie folgend, hängt die bis zur Makrorissbildung ertragbare Lastwechselzahl im Spaltzug-Schwellversuch von der elastischen Anfangsdehnung ab, unabhängig von der Temperatur bei der sie erregt wurde.

Diese Eigenschaft der Spaltzug-Schwellversuche wird an der TU Dresden zur Ermittlung von Ermüdungsfunktionen für die Dimensionierung von Asphaltbefestigungen genutzt [36].

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit dieses Konzeptes auf die Ergebnisse der einaxialen Zug-Schwellversuche sind in Abbildung 4-13 die temperaturunabhängigen Ermüdungsfunktionen für die Frequenzen 3 Hz und 10 Hz dargestellt.

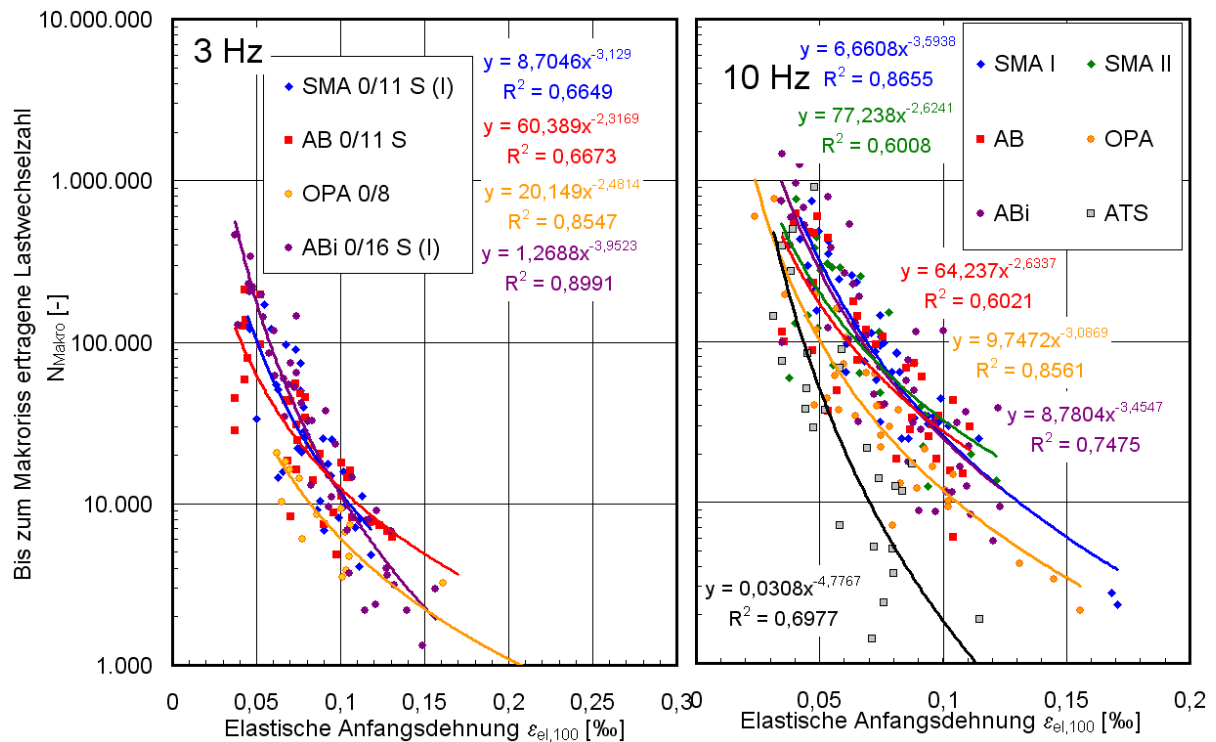


Abbildung 4-13: Temperaturunabhängige Ermüdungsfunktionen der untersuchten Asphalte aus einaxialen Zug-Schwellversuchen

Anhand der Bestimmtheitsmaße ist zu erkennen, dass durch die temperaturunabhängige Auswertung bei der Anwendung der Ermüdungsfunktionen höhere Abweichungen zu erwarten sind.

Dies zeigt sich auch in Abbildung 4-14, die die Prognosegenauigkeit der temperaturunabhängigen Ermüdungsfunktionen zeigt. Auffällig ist die mit Werten zwischen 0,65 und 0,94 geringe Größenordnung der ermittelten Exponenten. Für hohe Beanspruchungen, die hohe elastische Dehnungen bewirken, ergibt die Prognose höhere Lastwechselzahlen als sie in den Prüfungen tatsächlich ertragen wurden. Für geringe Beanspruchungen erfolgt dagegen eine Prognose „zur sicheren Seite“, da die Prognose-Lastwechselzahlen die tatsächlich ertragbaren unterschreiten.

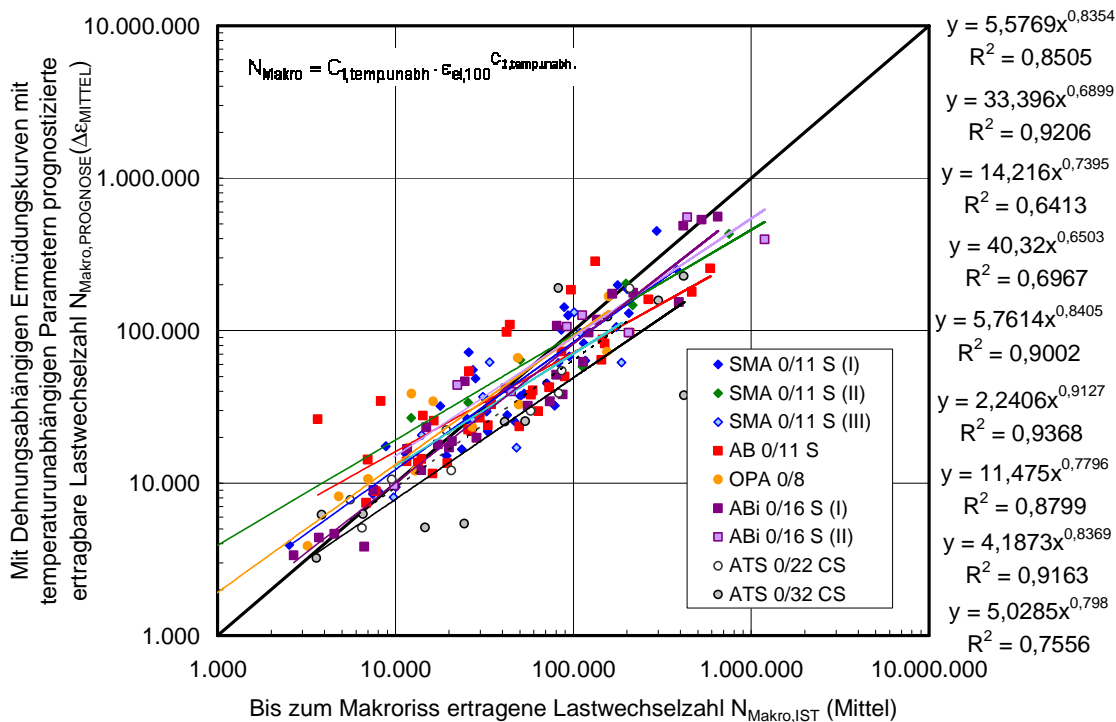


Abbildung 4-14: Vergleich der mittels temperaturunabhängiger, dehnungsabhängiger Ermüdungsfunktionen prognostizierten ertragbaren Lastwechselzahlen mit den tatsächlich in Zug-Schwellversuchen ermittelten Mittelwerten

4.6.2 Prognose mit spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen mit einheitlichen Exponenten

In Kapitel 4.4 konnte gezeigt werden, dass der Ermüdungsfunktionskoeffizient K_1 der ertragbaren Lastwechselzahl bei einer Spannungsdifferenz $\Delta\sigma = 1,0$ MPa entspricht. Gleichzeitig zeigt Abbildung 4-6, dass der Temperatureinfluss auf den Exponenten K_2 uneinheitlich und eher gering ist. Dies erlaubt die Überlegung, Ermüdungsfunktionen aufzustellen, bei denen als temperaturabhängiger Koeffizient K_1 die Lastwechselzahl einfließt, die bei einer Spannungsdifferenz von $\Delta\sigma = 1,0$ MPa ermittelt wird, während der Exponent K_2 unabhängig von der Temperatur konstant gehalten wird (Gleichung 4.4). Der Exponent K_2 wird mit neun Einzelversuchen bei einer zu bestimmenden Temperatur ermittelt, während bei jeder weiteren Prüftemperatur lediglich Prüfungen bei einer Spannungsdifferenz $\Delta\sigma = 1,0$ MPa durchgeführt werden.

$$N_{\text{Makro}}(T, \Delta\sigma) = N_{\text{Makro}}(T, \Delta\sigma = 1,0 \text{ MPa}) \cdot \Delta\sigma^{K_2} \quad \text{Gleichung 4.4}$$

Im Folgenden wird untersucht, welche Prüftemperatur zur Ermittlung des Exponenten K_2 zur Anwendung kommen sollte. Dazu wird Gleichung 4.4 für die verschiedenen

Asphalte angewendet. Als Koeffizienten kommen die Mittelwerte der bei der jeweiligen Prüftemperatur für die Spannungsdifferenz $\Delta\sigma = 1$ MPa gemessenen Lastwechselzahlen zur Anwendung. Als Exponent wird jeweils ein Exponent K_2 (Tabelle 4.1) einheitlich für alle Prüftemperaturen angewendet.

Die für den ABl 0/16 S (I) unter Verwendung der verschiedenen, jeweils konstanten Exponenten erreichte Prognosequalität ist in Abbildung 4-15 dargestellt. Eine gute Übereinstimmung zwischen den tatsächlichen Ergebnissen und den unter Anwendung der Ermüdungsfunktionen berechneten besteht dann, wenn der Exponent einen Wert um 1 annimmt ($N = N^1$) und ein hohes Bestimmtheitsmaß vorliegt. Im Falle des dargestellten ABl 0/16 S ergibt sich die höchste Qualität bei Anwendung des Exponenten $K_2(0^\circ\text{C})$ der für die Prüftemperatur 0°C ermittelt wurde.

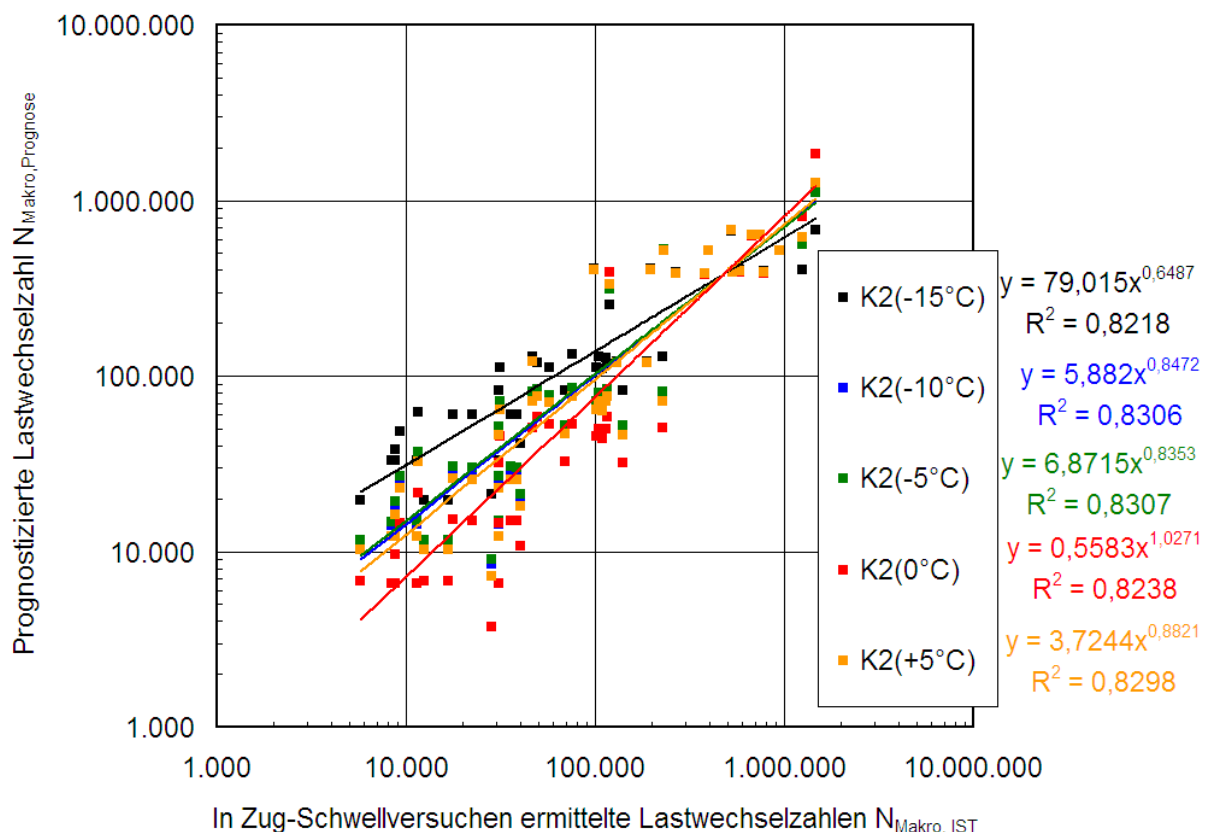


Abbildung 4-15: Prognosequalität von Ermüdungsfunktionen mit verschiedenen temperaturabhängigen Exponenten K_2 (ABi 0/16 S)

Die entsprechenden Darstellungen für die anderen untersuchten Asphalte und die für die verschiedenen Werte K_2 ermittelten Exponenten und Bestimmtheitsmaße der Prognosekontrollen sind in Anlage 5 zusammengestellt.

Bei den in [24] untersuchten Asphalten kam die Spannungsdifferenz $\Delta\sigma = 1,0$ MP nicht zur Anwendung. Der dem Koeffizienten K_1 entsprechende Koeffizient wurde aus dem der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma = 1,0$ MPa nächstliegenden Wert mit Gleichung 4.5 berechnet.

$$K_1 = N_{\text{Makro}}(\Delta\sigma = 1,0) = N_{\text{Makro}}(\Delta\sigma = x) \cdot x^{-K_2} \quad \text{Gleichung 4.5}$$

Abbildung 4-16 zeigt die in den Prognosekontrollen an den neun Asphalten ermittelten Exponenten und die erreichten Bestimmtheitsmaße in Abhängigkeit von der Temperatur, bei der der Exponent K_2 ermittelt wurde. Sowohl die Exponenten als auch die Bestimmtheitsmaße weisen bei einer Temperatur um -2°C die höchsten Werte auf (hervorgehoben mittels Polynom 2. Grades).

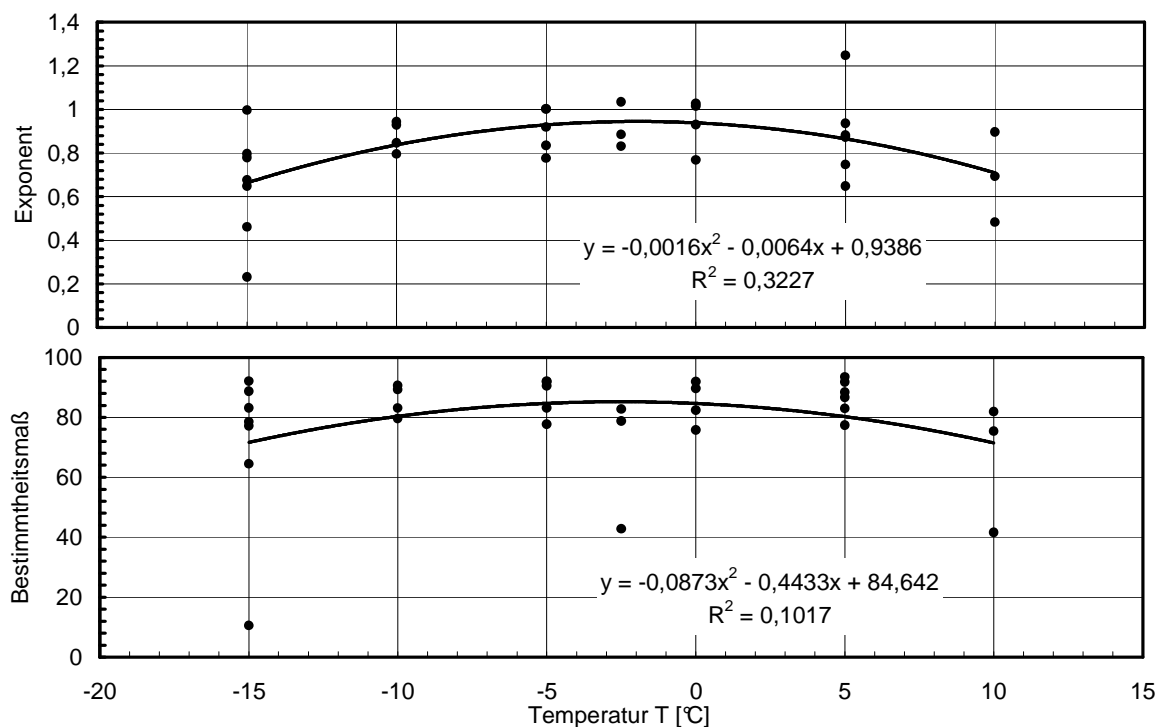


Abbildung 4-16: Bei der Prognosekontrolle ermittelte Exponenten und Bestimmtheitsmaße in Abhängigkeit von der Temperatur, bei der der Exponent K_2 ermittelt wurde

Die mit diesem Verfahren erreichte Prognosequalität zeigt Abbildung 4-17. Mit Ausnahme des SMA 0/11 S (III) werden hohe Bestimmtheitsmaße ($R^2 > 85\%$) erreicht. Als problematisch müssen die hohen Exponenten angesehen werden, die für den SMA 0/11 S (III), den ABi 0/16 S (I) sowie ATS 0/22 CS ermittelt werden, da

sie vor allem bei geringen Beanspruchungen zu unterdimensionierten Befestigungen führen können.

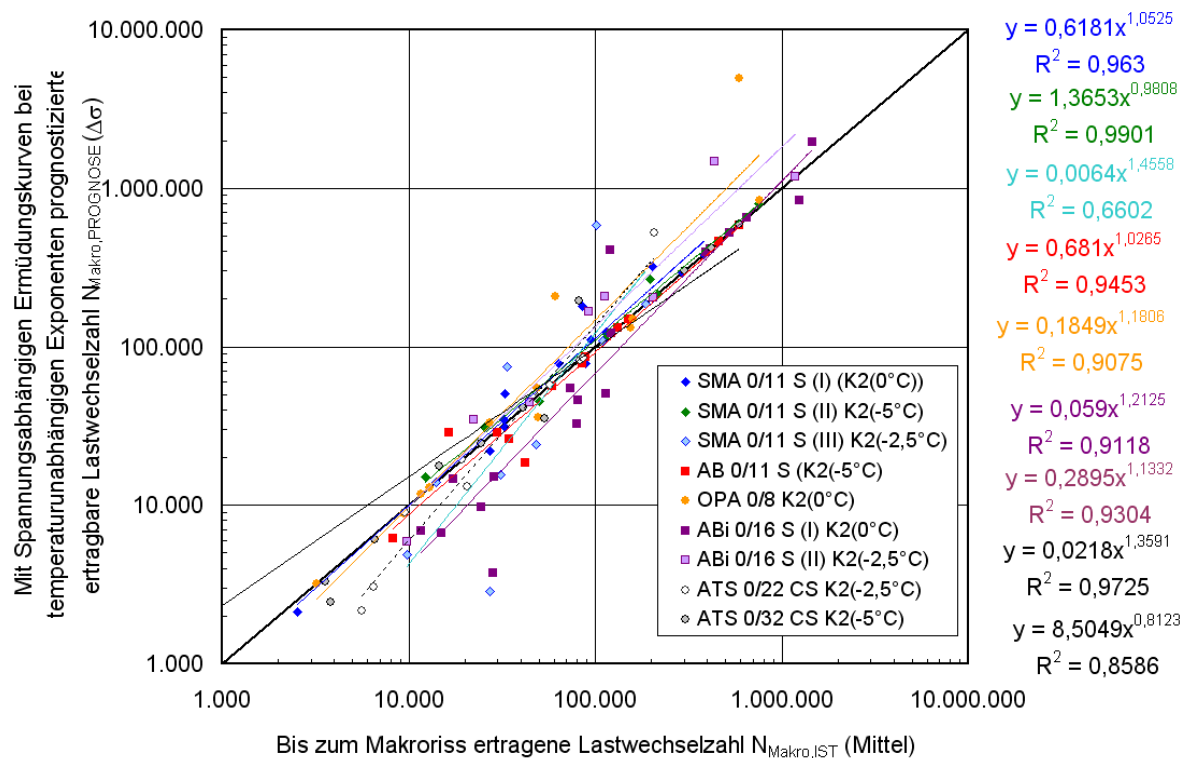


Abbildung 4-17: Vergleich der mittels spannungsabhängiger Ermüdungsfunktionen mit temperaturunabhängigen Exponenten ermittelten prognostizierten ertragbaren Lastwechselzahlen mit den tatsächlich in Zug-Schwellversuchen ermittelten Mittelwerten

Das geschilderte Verfahren bietet die Möglichkeit mit einem relativ geringen Prüfaufwand temperaturabhängige Ermüdungsfunktionen aufzustellen, mit denen sowohl die aus dem Verkehr herrührende Beanspruchung als auch die unvermeidlichen thermischen Beanspruchungen berücksichtigt werden können. Dazu sind folgende Arbeitsschritte notwendig:

1. Ermittlung der ertragbaren Lastwechselzahl bei einer Spannungsdifferenz (z.B. $\Delta\sigma = 1,0 \text{ MPa}$) bei den gewünschten Prüftemperaturen mit jeweils dreifach belegten Zug-Schwellversuchen. Da vor allem bei tiefen Temperaturen Zug-Schwellversuche mit dieser Spannungsdifferenz erfahrungsgemäß hohe Lastwechselzahlen erreichen, kann zwecks Zeitraffung eine höhere Spannungsdifferenz verwendet werden.
2. Ermittlung der Ermüdungsfunktion bei einer Temperatur von 0°C mit insgesamt neun Zug-Schwellversuchen (3 Spannungsdifferenzen mit dreifacher Belegung):
Ermittlung des Exponenten K_2 und des Koeffizienten $K_1(0^\circ\text{C})$.
3. Berechnung der Faktoren K_1 mit Gleichung 4.5, falls von $\Delta\sigma = 1,0 \text{ MPa}$ abweichende Spannungsdifferenzen angewendet wurden.
4. Aufstellen der verschiedenen temperaturabhängigen Ermüdungsfunktionen:

$$N_{\text{Makro}}(T, \Delta\sigma) = K_1(T) \cdot \Delta\sigma^{K_2(0^\circ\text{C})}$$

Unter Anwendung dieses Verfahrens ist die Durchführung von neun Zug-Schwellversuchen bei einer Prüftemperatur von 0°C sowie drei Zug-Schwellversuchen je zusätzlicher Prüftemperatur notwendig.

Neben der Erfassung der Lastwechselzahl, die zur Rissbildung und somit zum Versagen des Probekörpers im Zug-Schwellversuch führt, erlaubt die während der Versuche gemessene Dehnung die Ermittlung des absoluten E-Moduls als weitere wichtige Eingangsgröße in Dimensionierungsrechnungen. Weiterhin kann der Verlauf der viskoelastischen Dehnungsanteile zur Interpretation des Ermüdungsverhaltens herangezogen werden.

5 Auswirkungen der Materialermüdung: Abnahme der Steifigkeit

5.1 Absoluter Elastizitätsmodul und Phasenwinkel

Die Steifigkeit eines Asphaltes bestimmt maßgebend die Spannungsverteilung innerhalb der Asphaltbefestigung und somit auch die Beanspruchung, die das Material unter Belastung ertragen muss. Die Kennwerte zur Beschreibung der vom viskoelastischen Materialverhalten geprägten Asphaltsteifigkeit sind der absolute E-Modul $|E|$ und der Phasenwinkel φ .

In Tabelle 5.1 sind die Mittelwerte und Variationskoeffizienten von den in Zug-Schwellversuchen gemessenen absoluten E-Moduln und Phasenwinkeln zusammengestellt und in den Abbildung 5-1 und 5.2 in Abhängigkeit von der Temperatur T und der Frequenz f vergleichend dargestellt. Mit abnehmender Temperatur und zunehmender Frequenz werden höhere absolute E-Moduln erreicht.

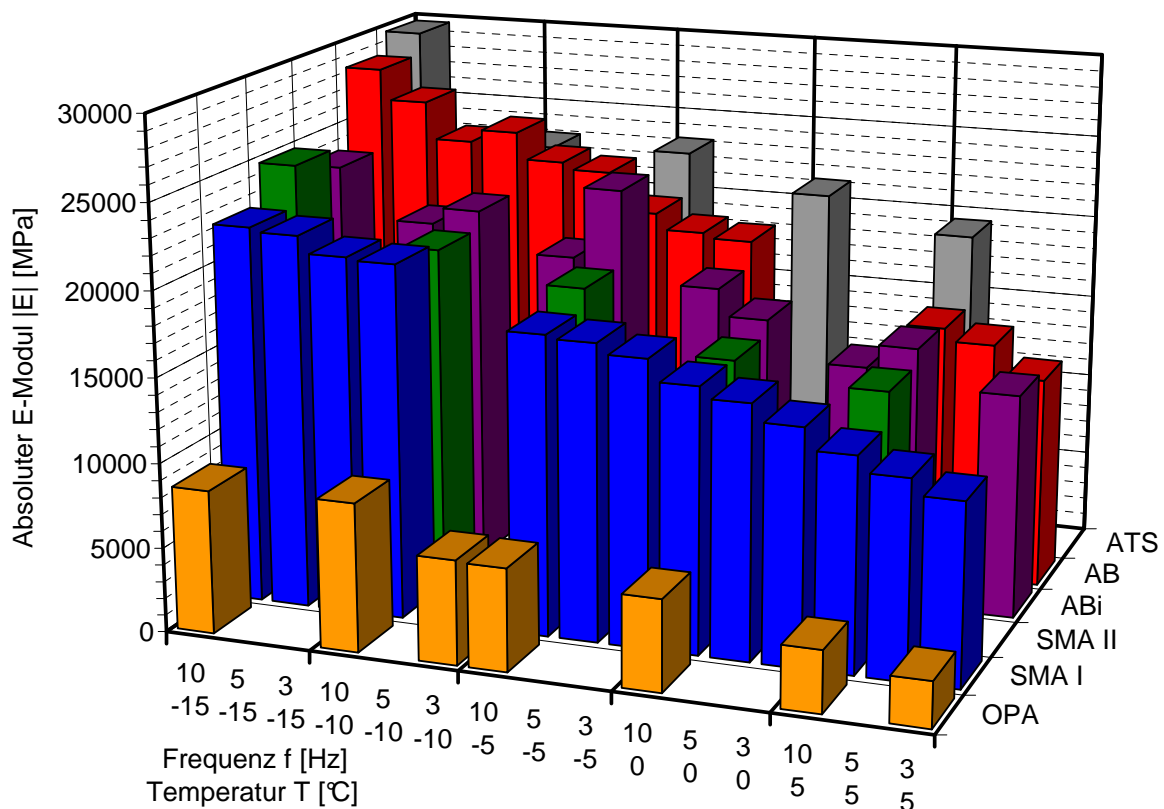


Abbildung 5-1: In Zug-Schwellversuchen ermittelte mittlere absolute E-Moduln $|E|$ in Abhängigkeit der Prüftemperatur T und der Frequenz f

Tabelle 5.1: Mittelwerte und Variationskoeffizienten der in Zug-Schwellversuchen bei $\Delta\sigma = 1$ MPa ermittelten absoluten E-Moduln und Phasenwinkel

	Temperatur T [°C]	Frequenz f [Hz]	Absoluter E-Modul E [MPa]		Phasenwinkel φ [°]		
			Mittel	Var.-Koeff [%]	Mittel	Var.-Koeff [%]	
SMA 0/11 S (I)	-15	3	21.111	4,4	nicht ermittelt		
		5	22.120	4,1			
		10	22.356	5,6			
	-10	10	20.945	3,1			
		-5	3	16.900			5,6
			5	17.500			3,2
	10		17.700	6,6			
	0	3	13.921	4,5			
		5	14.957	4,7			
		10	15.621	1,7			
	5	3	10.725	5,7			
		5	11.691	3,1			
10		12.639	4,6				
SMA 0/11 S (II)	-15	10	24.746	9,2	7,021	3,4	
	-10	10	20.414	5,3	6,635	6,3	
	-5	10	18.907	12,3	7,624	22,4	
	0	10	15.511	3,8	9,226	1,3	
	5	10	14.580	13,1	15,312	24,4	
AB 0/11 S	-15	3	24.304	6,3	5,628	16,6	
		5	26.536	6,1	8,319	18,6	
		10	28.376	7,1	6,898	47,3	
	-10	3	23.014	5,3	6,969	23,4	
		5	23.444	7,3	6,111	27,0	
		10	25.056	4,3	5,871	10,5	
	-5	3	19.471	9,4	9,742	19,1	
		5	19.765	10,7	9,581	30,1	
		10	20.715	7,5	8,446	16,2	
	5	3	12.589	7,9	13,907	7,6	
		5	14.440	4,4	13,490	4,3	
		10	15.192	4,0	12,717	5,2	
OPA 0/8	-15	10	8.479	12,9	8,113	18,1	
		3	6.145	18,2	10,668	18,3	
	-10	10	8.752	16,3	8,651	64,4	
		10	6.043	10,7	12,311	15,3	
	0	10	5.383	9,3	15,288	4,2	
		3	2.694	11,7	22,182	7,7	
ABi 0/16 S	-15	3	20.448	16,4	6,769	20,3	
		10	23.442	16,2	9,117	22,5	
	-10	3	19.107	10,7	7,438	11,6	
		10	21.438	18,1	8,078	25,5	
	-5	3	17.984	12,9	7,992	10,5	
		10	23.363	8,0	8,171	12,2	
	0	3	14.094	8,9	8,941	8,4	
		10	16.384	7,8	8,832	7,9	
	5	3	13.284	12,8	11,377	11,8	
		10	15.486	7,2	10,494	6,2	
	ATS 0/32 CS	-15	10	29.685	7,8	10,365	26,6
		-10	10	22.978	23,0	8,988	28,4
-5		10	23.235	20,9	11,934	29,8	
0		10	21.234	15,4	12,690	17,4	
5		10	19.377	23,1	15,654	11,0	

Abbildung 5-2 zeigt vergleichend die Mittelwerte der in den Zug-Schwellversuchen gemessenen Phasenwinkel φ . Der bei den absoluten E-Moduln beobachtete Anstieg der Steifigkeit mit Zunahme der Frequenz und Abnahme der Temperatur bewirkt eine Abnahme des Phasenwinkels.

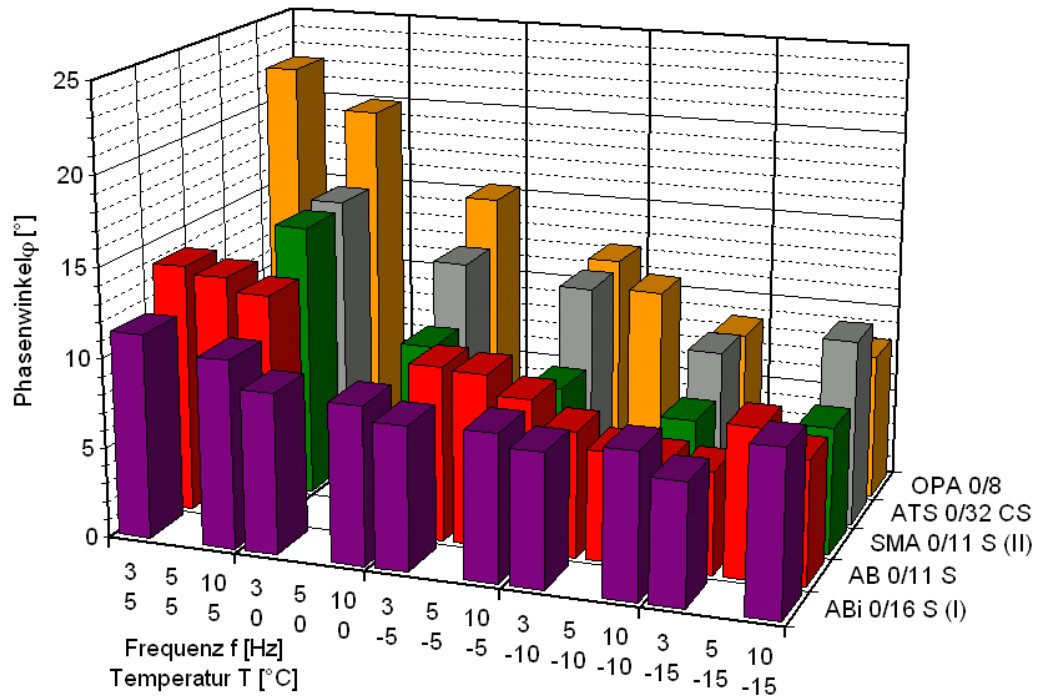


Abbildung 5-2: In Zug-Schwellversuchen ermittelte mittlere Phasenwinkel φ in Abhängigkeit der Prüftemperatur T und der Frequenz f

5.2 Temperatur-Frequenz-Äquivalenz der Steifigkeit

Durch Anwendung der in Kapitel 2.4.5 beschriebenen Arrhenius-Funktion können die bei verschiedenen Temperaturen ermittelten absoluten E-Moduln und Phasenwinkel auf eine Referenztemperatur bezogen und in Abhängigkeit von der korrigierten Frequenz als Master-Kurve dargestellt werden. In Abbildung 5-3 sind die ermittelten absoluten E-Moduln $|E|$ und Phasenwinkel φ als Masterkurven in Abhängigkeit von der mittels Gleichung 2.27 berechneten korrigierten Frequenz für eine Referenztemperatur von $T_R = -5\text{ °C}$ dargestellt. Für alle Asphalte wurden die Verschiebungsfaktoren α_T unter Verwendung eines einheitlichen Wertes $m = 25.000$ ermittelt (vgl. Kapitel 2.4.5).

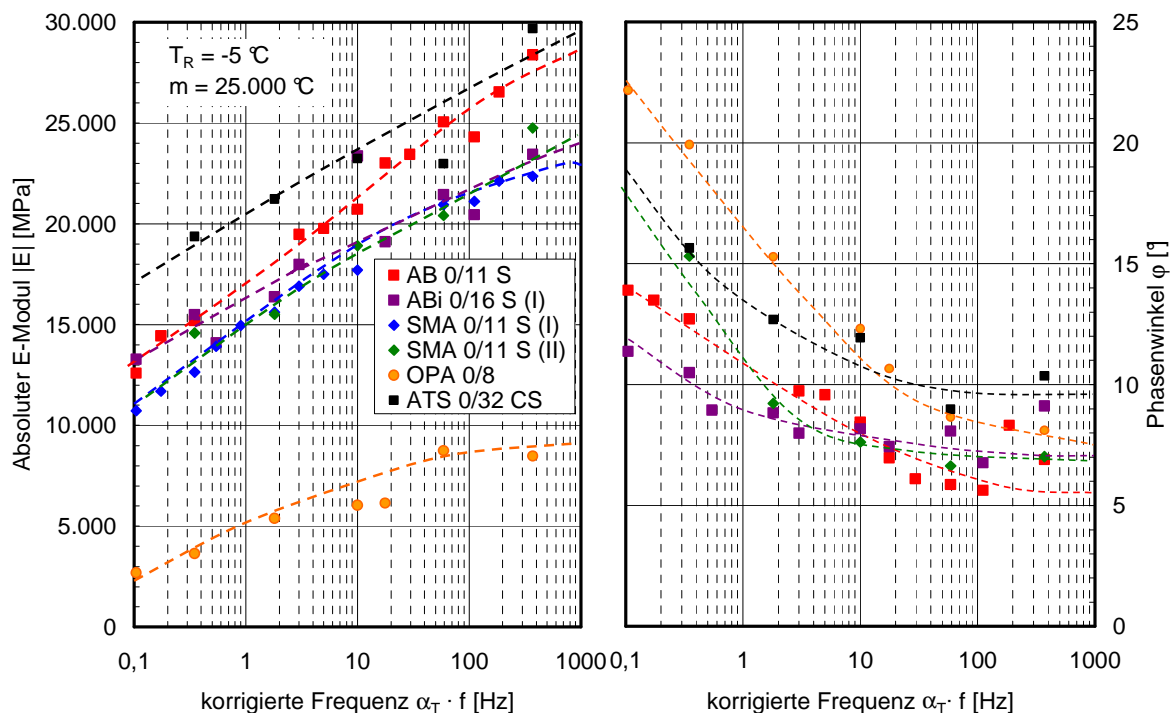


Abbildung 5-3: Master-Kurven des absoluten E-Moduls $|E|$ und des Phasenwinkels φ in Abhängigkeit von der korrigierten Frequenz für eine Referenztemperatur $T_R = -5\text{ °C}$

5.3 Quasi-lineare Abnahme des absoluten E-Moduls

Die in Kapitel 2.5.3 zusammengestellten Modelle beschreiben die Entwicklung der Schädigung infolge Materialermüdung. Das dabei maßgebende Kriterium ist die quasi-lineare Abnahme der Steifigkeit. Im Folgenden wird der Verlauf des absoluten E-Moduls in den Zug-Schwellversuchen analysiert.

Neben dem Verlauf der bleibenden Dehnung wurde auch der Verlauf der elastischen Dehnungsanteile während der Zug-Schwellversuche aufgezeichnet. Daraus kann die Änderung des absoluten E-Moduls im Laufe des Ermüdungsversuchs bestimmt werden (vgl. Abbildung 5-4). In allen durchgeführten Zug-Schwellversuchen weist der Verlauf des absoluten E-Moduls von Beginn an bzw. bei geringen Beanspruchungen nach einer konstanten Phase eine quasi-linear verlaufende Abnahme auf. Ab einer bestimmten Lastwechselzahl nimmt die Abnahme des absoluten E-Moduls überproportional zu, bis der absolute E-Modul zum Zeitpunkt des Bruches senkrecht auf Null abfällt.

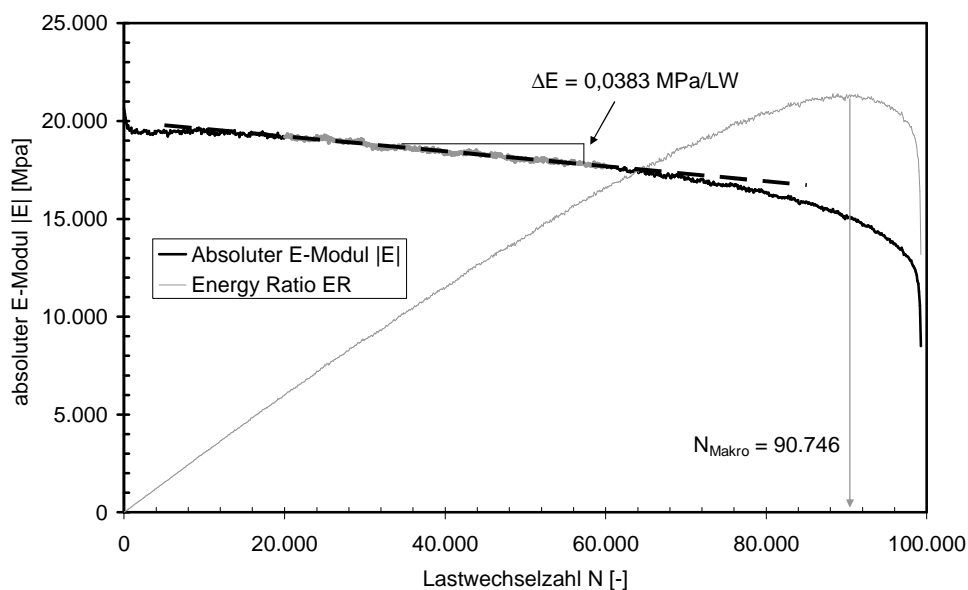


Abbildung 5-4 Ermittlung der Neigung der linearen E-Modul-Abnahme ΔE und Verlauf der Energy Ratio ER am Beispiel eines Zug-Schwellversuchs (AB 0/11 S, $T = -5^\circ\text{C}$; $f = 5 \text{ Hz}$; $\Delta\sigma = 1,55 \text{ MPa}$)

Im linearen Bereich kann der Verlauf des absoluten E-Moduls mit Gleichung 5.1 beschrieben werden. Zum Ausgleich der bei den verschiedenen Prüftemperaturen

deutlichen Unterschiede des absoluten E-Moduls am Versuchsanfang kann die relative Abnahme des absoluten E-Moduls nach Gleichung 5.2 berechnet werden.

$$|E|(N) = E_0 - \Delta E \cdot N \quad \text{Gleichung 5.1}$$

$$|E|(N) = E_0 \cdot \left(1 - \frac{\Delta E}{E_0} \cdot N\right) \quad \text{Gleichung 5.2}$$

Exemplarisch für die Temperatur $T = +5^\circ\text{C}$ und die Frequenz $f = 10 \text{ Hz}$ zeigt Abbildung 5-5 den Zusammenhang zwischen den in den Zug-Schwellversuchen gemessenen relativen linearen Abnahmen des absoluten E-Moduls und den bis zum Makroriss ertragbaren Lastwechselzahlen für sechs Asphaltvarianten. Die ermittelten Neigungen der linearen Abnahme der absoluten E-Moduln weisen einen engen Zusammenhang mit der ertragbaren Lastwechselzahl auf, der durch eine Potenzfunktion beschrieben werden kann. Für alle sechs untersuchten Asphalte werden dabei hohe Bestimmtheitsmaße erreicht. Auffällig ist, dass die Exponenten Werte um -1 annehmen. Dies erlaubt den Schluss, dass der Zusammenhang zwischen relativer Abnahme des absoluten E-Moduls und ertragbarer Lastwechselzahl vereinfacht mit Gleichung 5.3 beschrieben werden kann.

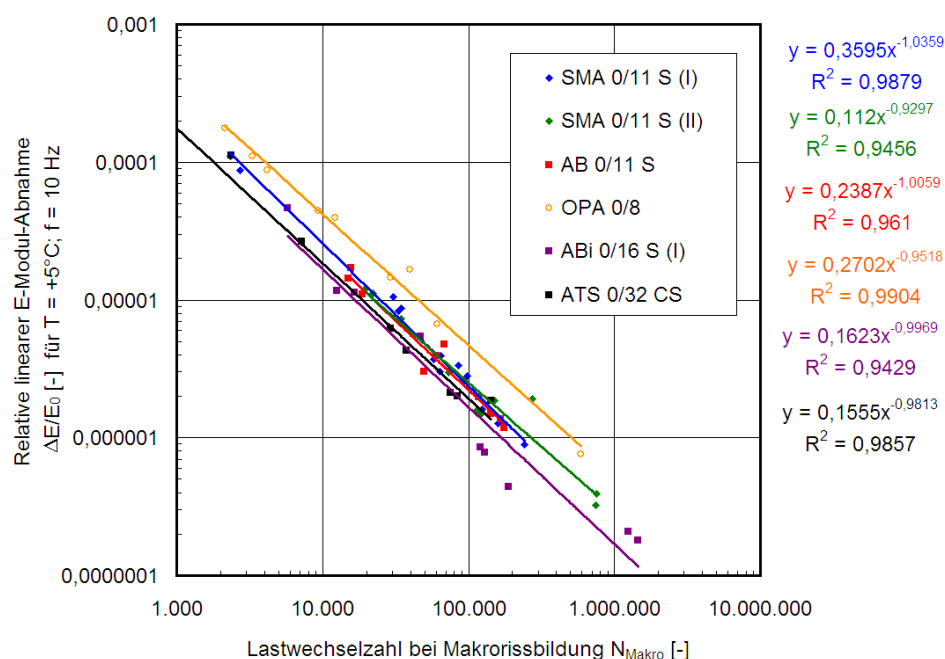


Abbildung 5-5 Zusammenhang zwischen der im Zug-Schwellversuch ertragbaren Lastwechselzahl N_{Makro} mit der relativen Abnahme des absoluten E-Moduls $\Delta E/E_0$

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{S}{N_{\text{Makro}}}$$

Gleichung 5.3

Die ermittelten Koeffizienten S und die durch die Anpassung mit Gleichung 5.3 erreichten Bestimmtheitsmaße sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt. Ein großer Wert von S bedeutet, dass bis zum Eintreten des Makrorisses eine hohe relative Abnahme des absoluten E-Moduls beobachtet werden kann. Bei einem kleinen Koeffizienten S wurde bis zum Makroriss nur eine geringe Abnahme des absoluten E-Moduls beobachtet. Meist werden Bestimmtheitsmaße von über 90 % erreicht, wobei aber zahlreiche Bestimmtheitsmaße deutlich schlechter sind. Die vor allem bei -15°C schlechte Anpassungsqualität hat ihre Ursache darin, dass bei tiefen Temperaturen die elastischen Verformungen im Bereich der Messgenauigkeit der Prüfeinrichtung liegen und somit eine präzise Auswertung erschweren.

Tabelle 5.2: Koeffizient S und erreichtes Bestimmtheitsmaß für die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen relativer Abnahme des absoluten E-Moduls und ertragbarer Lastwechselzahl bei $f = 10$ Hz

Temperatur T [$^\circ\text{C}$]	-15	-10	-5	0	5
SMA 0/11 S (I)	0,048 (66 %)	-	0,112 (95 %)	0,097 (97 %)	0,117 (99 %)
SMA 0/11 S (II)	0,026 (1 %)	0,056 (90 %)	0,116 (90 %)	0,192 (99 %)	0,243 (99 %)
AB 0/11 S	0,094 (96 %)	0,082 (90 %)	0,147 (60 %)	-	0,230 (96 %)
OPA 0/8	0,234 (95 %)	0,308 (97 %)	0,277 (6 %)	0,357 (99 %)	0,376 (99 %)
ABi 0/16 S	0,145 (35 %)	0,083 (90 %)	0,068 (50 %)	0,116 (99 %)	0,239 (96 %)
ATS 0/32 CS	0,125 (0 %)	0,04 (93 %)	0,122 (99 %)	0,233 (99 %)	0,146 (97 %)

Die in Tabelle 5.2 zusammengestellten Koeffizienten S sind in Abbildung 5-6 in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen, wobei die Werte, die durch Regressionen mit geringen Bestimmtheitsmaßen ($R^2 < 90$ %) durch leere Punkte markiert sind. Außer beim ABi 0/16 S (I) und bei der ATS 0/32 CS bei der Temperatur von -15°C ordnen sich diese Punkte in die Temperaturabhängigkeit der Werte mit hohen Bestimmtheitsmaßen ein. Mit sinkender Prüftemperatur kann eine Abnahme von S beobachtet werden. Bei sehr tiefen Temperaturen ereignet sich der Bruch im Zug-Schwellversuch eher spontan, ohne dass der absolute E-Modul deutlich reduziert wurde. Bei höheren Temperaturen erträgt der Asphalt eine weitaus deutlicher ausgeprägte Abnahme des absoluten E-Moduls bevor er versagt.

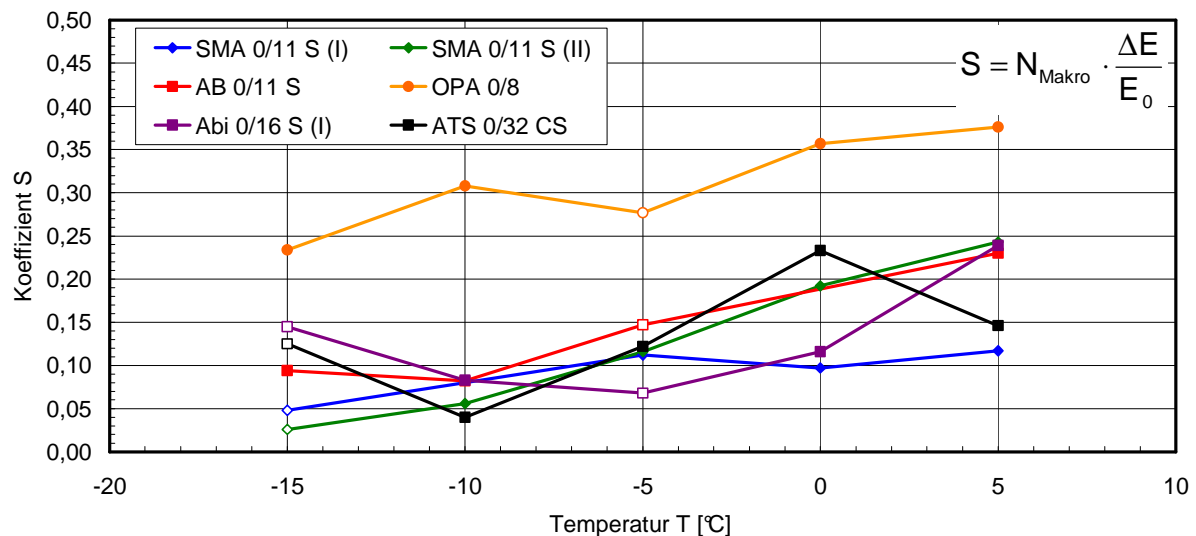


Abbildung 5-6: Koeffizient S zur Verknüpfung der relativen Abnahme des absoluten E-Moduls mit der ertragbaren Lastwechselzahl in Abhängigkeit von der Temperatur ($f = 10 \text{ Hz}$)

Die Ergebnisse zeigen, dass die ertragbare Lastwechselzahl sehr eng mit der Neigung der linearen E-Modul-Abnahme zusammenhängt. Wird die in Kapitel 2.5.4 erläuterte Theorie des durch Rissbildung reduzierten Querschnittes zur Interpretation der Ergebnisse herangezogen, so bedeutet eine hohe Neigung der relativen E-Modul-Abnahme ein schnell voranschreitendes Risswachstum. Dies führt zu einem Anstieg der Beanspruchung in der verbleibenden Querschnittsfläche und somit zu einem früheren Versagen, das sich auch in Form eines Makrorisses ausbildet. Je schneller die Abnahme des absoluten E-Moduls abläuft, desto früher versagt der Probekörper.

Die relative Abnahme des absoluten E-Moduls kann somit auch als Ermüdungskriterium herangezogen werden. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass Zug-Schwellversuche, die bei geringen Belastungen durchgeführt werden, bereits vor dem eigentlichen Versagen des Probekörpers in Form eines Makrorisses oder des endgültigen Bruches beendet werden können.

In Anlage 6 sind die relativen Abnahmen des absoluten E-Moduls in Abhängigkeit von der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ aufgetragen. Exemplarisch zeigt Abbildung 5-7 die Ergebnisse am Beispiel des ABi 0/16 S (I). Auch diese Ermüdungsparameter $\Delta E/E_0$ zeigen eine hohe Abhängigkeit von der Spannungsdifferenz, die durch eine Potenzfunktion (Gleichung 5.4) beschrieben werden kann. Die bei der Frequenz 90

$f = 10$ Hz ermittelten Parameter der Potenzfunktionen sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst und in Abbildung 5-8 in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = S_1 \cdot \Delta \sigma^{S_2}$$

Gleichung 5.4

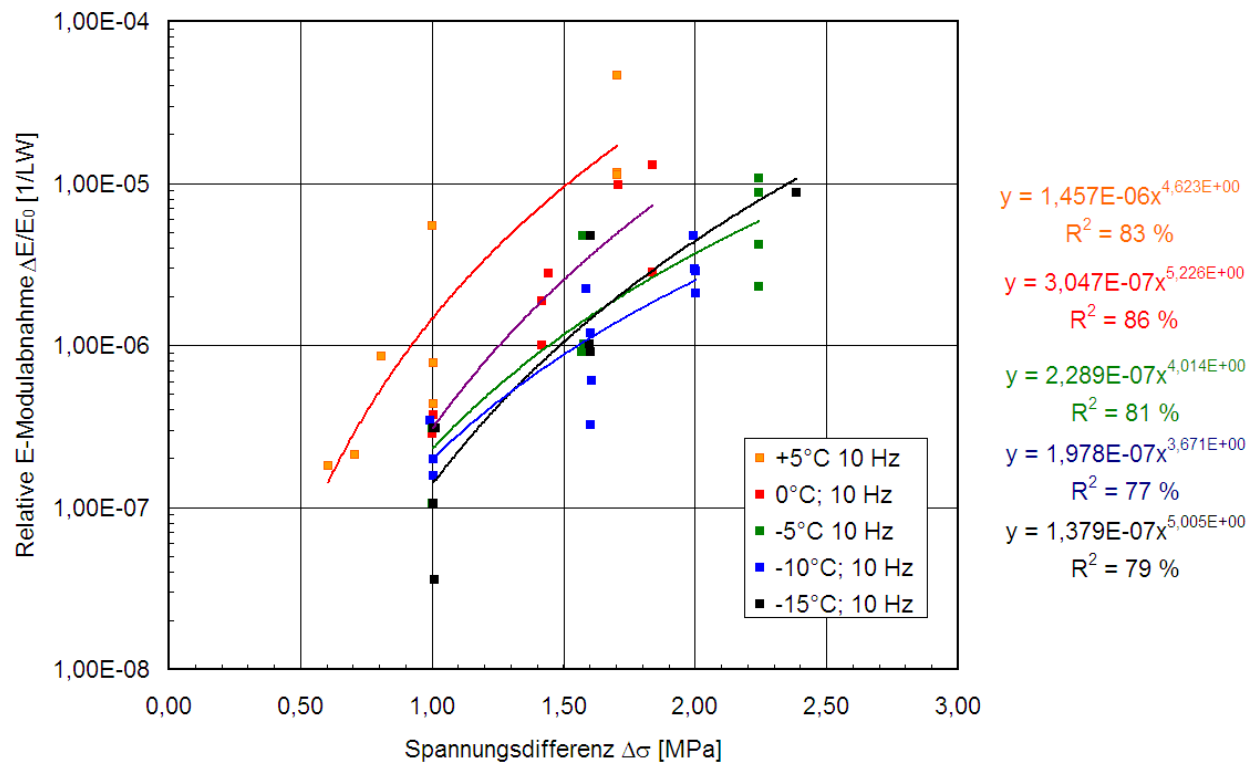


Abbildung 5-7: Relative Abnahme des absoluten E-Moduls in Abhängigkeit von der Spannungsdifferenz $\Delta \sigma$ in Zug-Schwellversuchen am ABi 0/16 S (I) bei einer Frequenz $f = 10$ Hz

Mit abnehmender Temperatur kann eine deutliche Reduktion des Koeffizienten S_1 erkannt werden, der die relative Abnahme des absoluten E-Moduls bei Belastung mit einer Spannungsdifferenz $\Delta \sigma = 1,0$ MPa beschreibt. Bei tiefen Temperaturen bewirkt diese Beanspruchung eine um mehrere Zehnerpotenzen langsamere Steifigkeitsabnahme infolge Risswachstums als bei hohen Temperaturen. Auffällig sind die hohen Werte, die der OPA 0/8 erreicht, der aufgrund seines hohen Hohlraumgehaltes sehr empfindlich auf die Beanspruchung reagiert.

Tabelle 5.3: Koeffizienten und Bestimmtheitsmaße zur Berechnung der relativen Abnahme des absoluten E-Moduls in Abhängigkeit von der Spannungsdifferenz mit Gleichung 5.4

Temperatur T [°C]		$\frac{\Delta E}{E_0} = S_1 \cdot \Delta \sigma^{S_2}$			
		Koeffizient S_1	Exponent S_2	Bestimmtheits- maß R^2 [%]	Anzahl der verfügbaren Wertepaare
SMA 0/11 S (I)	+5	$4,157 \cdot 10^{-6}$	3,891	94,5	14
	0	$8,751 \cdot 10^{-7}$	4,957	90,8	8
	-5	$2,750 \cdot 10^{-7}$	5,138	94,2	8
	-15	$2,416 \cdot 10^{-7}$	3,815	71,9	9
SMA 0/11 S (II)	+5	$2,617 \cdot 10^{-6}$	3,757	93,7	10
	-5	$7,697 \cdot 10^{-7}$	3,317	92,4	8
AB 0/11 S	+5	$9,842 \cdot 10^{-7}$	5,235	93,2	11
	-5	$3,376 \cdot 10^{-7}$	3,109	65,6	6
	-10	$1,823 \cdot 10^{-7}$	3,368	95,4	8
	-15	$3,964 \cdot 10^{-7}$	3,689	78,6	7
OPA 0/8	+5	$1,023 \cdot 10^{-3}$	3,130	95,7	10
	0	$5,272 \cdot 10^{-4}$	4,290	94,0	9
	-10	$1,871 \cdot 10^{-4}$	5,053	90,6	8
ABi 0/16 S (I)	+5	$1,457 \cdot 10^{-6}$	4,623	83,3	9
	0	$3,047 \cdot 10^{-7}$	5,226	86,3	9
	-5	$2,289 \cdot 10^{-7}$	4,014	81,4	10
	-10	$1,978 \cdot 10^{-7}$	3,671	77,1	11
	-15	$1,379 \cdot 10^{-7}$	5,005	79,1	8
ATS 0/32 CS	+5	$9,712 \cdot 10^{-6}$	5,429	51,9	8
	0	$9,599 \cdot 10^{-7}$	5,570	74,0	8
	-5	$2,599 \cdot 10^{-7}$	7,167	88,2	9
	-10	$6,333 \cdot 10^{-7}$	7,103	47,0	8
	-15	$3,096 \cdot 10^{-7}$	17,96	78,4	5

Die Exponenten S_2 liegen mit Ausnahme der für das Asphalttragschichtmaterial ermittelten Werte im Bereich zwischen 3 und 5 und weisen keine einheitliche Temperaturabhängigkeit auf.

Die mathematisch beschreibbare Abhängigkeit der Abnahme des absoluten E-Moduls von der Spannungsdifferenz deutet darauf hin, dass eine Beschreibung des Ermüdungsverhaltens über diese Größe möglich ist. Für gesicherte Aussagen sind Prüfungen notwendig, in denen der Messung der elastischen Verformungsanteile deutlich mehr Aufmerksamkeit geschenkt wird, als es im Rahmen der hier ausgewerteten Zug-Schwellversuche möglich war. Eine direkte Umrechnung der ertragbaren Lastwechselzahl aus der im Verlauf des Zug-Schwellversuchs beobachteten relativen

Abnahme des absoluten E-Moduls ist derzeit noch nicht möglich, da der die beiden Kenngrößen verknüpfende Koeffizient S sowohl vom Material als auch von der Temperatur abhängt. Daher kann die ertragbare Lastwechselzahl nicht pauschal aus der Abnahme des absoluten E-Moduls berechnet werden.

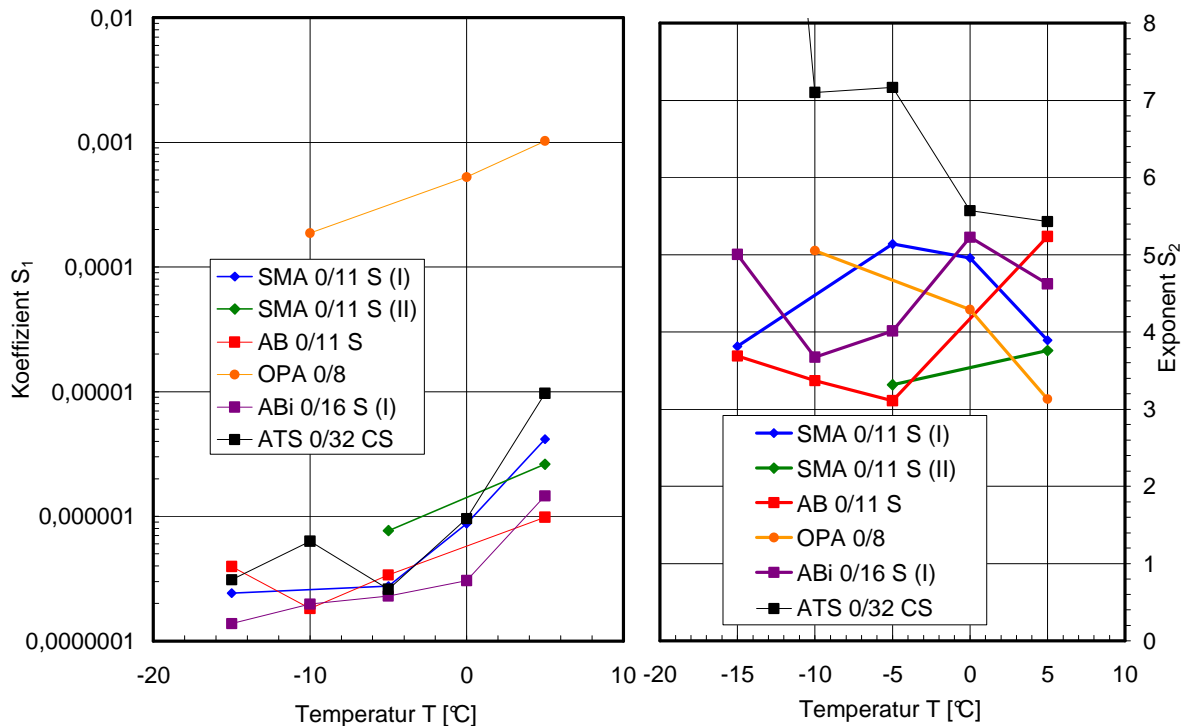


Abbildung 5-8: Koeffizienten S_1 und Exponenten S_2 zur Beschreibung der Spannungsabhängigkeit der relativen Abnahme des absoluten E-Moduls in Abhängigkeit von der Temperatur T

5.4 Verlauf des absoluten E-Moduls in der Schädigungsphase

Der zuvor beschriebenen linearen Phase des E-Modulverlaufs schließt sich eine beschleunigt fortschreitende Abnahme des absoluten E-Moduls an. Exemplarisch zeigt Abbildung 5-9 auf der linken Seite die aus den Einzelversuchen am AB 0/11 S bei einer Prüftemperatur $T = +5^\circ\text{C}$ und einer Spannungsdifferenz $\Delta\sigma = 1,3 \text{ MPa}$ gemittelten Verläufe der absoluten E-Moduli bei den drei untersuchten Frequenzen. Der Steifigkeitsverlauf der Versuche bei $f = 10 \text{ Hz}$ beginnt bei einer höheren Anfangssteifigkeit und verläuft über eine größere Zahl von Lastwechseln als die Versuche bei kleineren Frequenzen. Werden die in den Versuchen abnehmenden absoluten E-Moduln in Bezug zu den anfänglichen E-Moduln gesetzt und über der Zeit aufgetragen, so zeigen die Versuche bei den drei untersuchten Frequenzen sehr

ähnliche Verläufe, wie der rechte Teil der Abbildung 5-9 zeigt. Ähnlich wie die absolute Anzahl der ertragbaren Lastwechsel ist auch der Verlauf der Steifigkeit in erster Linie abhängig von der Zeitdauer der Belastung, unabhängig von der Frequenz, mit der diese aufgebracht wird. In Anlage 6.2 sind die Verläufe der absoluten E-Moduln für die weiteren Prüftemperaturen und Asphalte zusammengestellt.

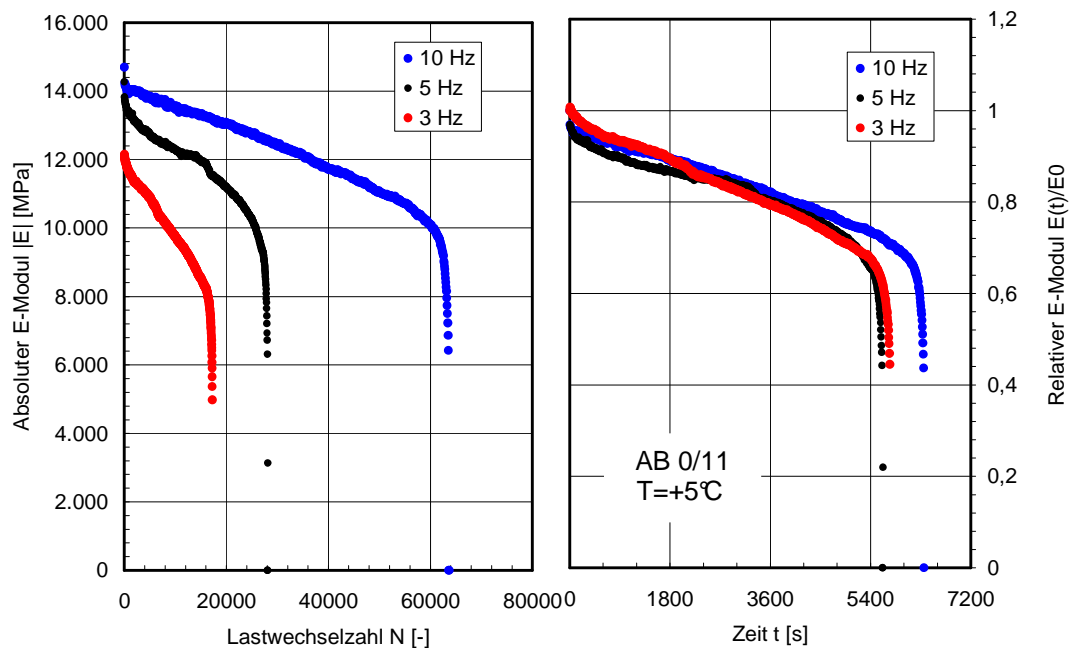


Abbildung 5-9: Gemittelter Verlauf des absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am AB 0/11 S bei $T = +5^{\circ}\text{C}$ und $\Delta\sigma = 1,3 \text{ MPa}$ bei verschiedenen Frequenzen über der Lastwechselzahl sowie über der Zeit

Neben den viskoelastischen Dehnungsanteilen, die zur Ermittlung des absoluten E-Moduls und dessen Änderung während der Versuche herangezogen wurden, bewirkt die Schwellbeanspruchung den Aufbau akkumulierter bleibender Dehnungen. Im folgenden Kapitel wird untersucht, ob die Interpretation des Ermüdungsverhaltens anhand von Zug-Schwellversuchen durch diesen Dehnungsanteil verfälscht wird, wie in der internationalen Literatur [11] bemängelt wird.

6 Auswirkung der Materialermüdung: Bleibende Dehnung

6.1 Bleibende Dehnung im Zug-Schwellversuch

Die im Zug-Schwellversuch ständig auf den Probekörper einwirkende Zugspannung bewirkt den Aufbau viskoplastischer Dehnungen. Abbildung 6-1 zeigt exemplarisch die mittleren Verläufe dieser akkumulierten bleibenden Dehnungen der Probekörper aus AB 0/11 S bei -5°C . In der Darstellung der Dehnungsverläufe in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl N ist auch das aus den Ermüdungsfunktionen gewonnene Ergebnis abzulesen, dass mit Zunahme der Beanspruchung die Asphaltprobekörper weniger Lastwechsel ertragen und geringere bleibende Dehnungen erreichen. Auch der Einfluss der Belastungsimpulslänge ist ersichtlich, dass mit zunehmender Frequenz höhere Bruchlastwechselzahlen erreicht werden können.

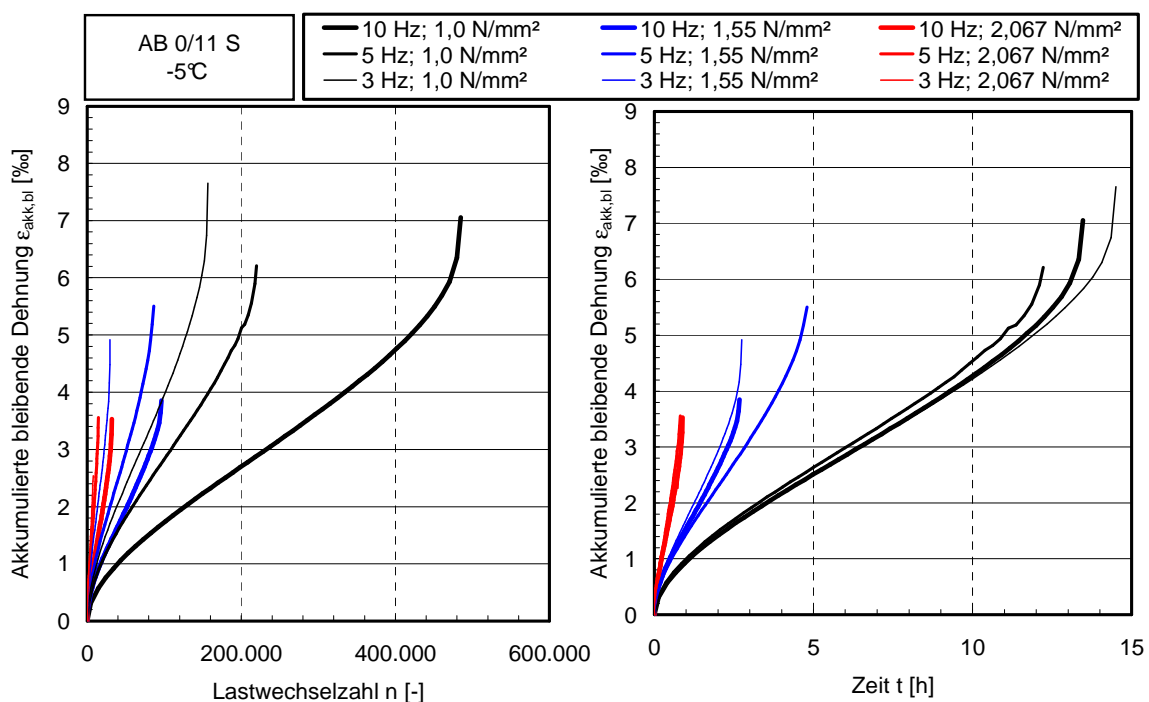


Abbildung 6-1: Gemittelte Verläufe der akkumulierten bleibenden Dehnungen über der Lastwechselzahl N sowie der Zeit t bei Variation der Frequenz und Spannungsdifferenz am Beispiel des AB 0/11 S bei -5°C

Werden die Verläufe der akkumulierten bleibenden Dehnung in Abhängigkeit von der Versuchsdauer dargestellt, so rücken die Dehnungsverläufe gleicher Beanspruchung trotz unterschiedlicher Frequenz zusammen. Diese Beobachtung, dass der Verlauf der akkumulierten bleibenden Dehnung bei gleicher Beanspruchung aber verschie-

denen Frequenzen offensichtlich allein von der Zeitdauer abhängt, in der der Probekörper einer Schwellbelastung ausgesetzt ist, kann bei allen geprüften Asphalten und jeder Prüftemperatur bestätigt werden. Die gemittelten Dehnungsverläufe in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl und der Zeit sind in Anlage 7 zusammengestellt.

6.2 Dehnungsverlauf im Retardationsversuch

Im Folgenden werden Ergebnisse von Retardationsversuchen ausgewertet, um zu prüfen, ob die in Kapitel 6.1 gezeigte Frequenzunabhängigkeit für die über die Zeit aufgetragene bleibende Dehnung auch in Kriechversuchen zu beobachten ist, in denen als Frequenz $f = 0$ angesetzt werden kann. Da bei den Retardationsversuchen zum Teil andere Prüftemperaturen zur Anwendung kamen als bei den Zug-Schwellversuchen, werden Gleichungen benötigt, um den Dehnungsverlauf im Retardationsversuch in Abhängigkeit von der Temperatur und der Spannung zu beschreiben.

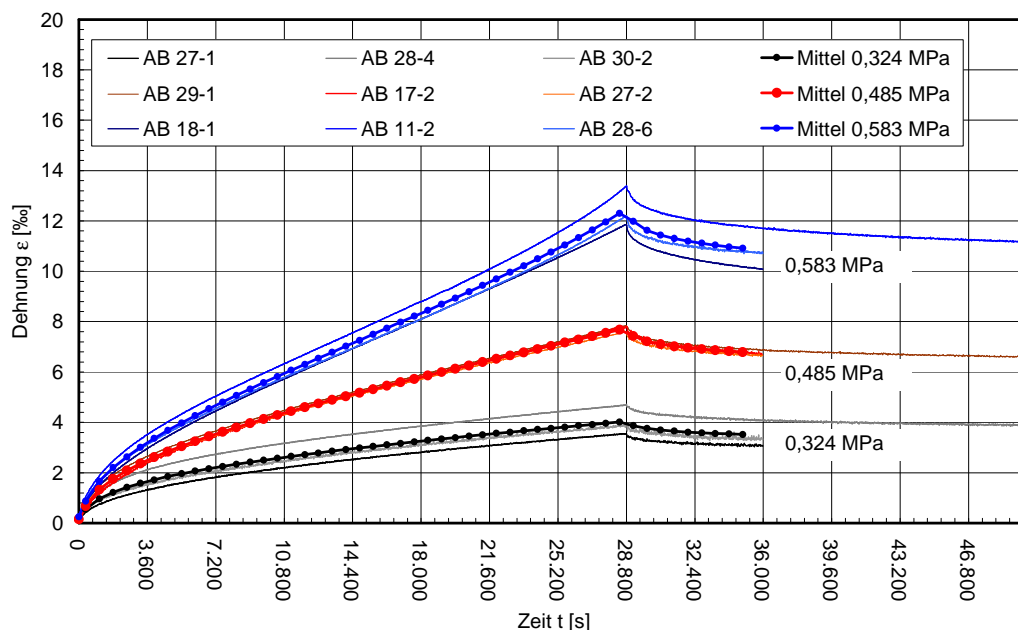


Abbildung 6-2: Retardationsversuch: Dehnungsverläufe der Prüfungen bei +5°C am AB 0/11 S an jeweils drei Probekörpern mit gemittelten Kurven

Das Ergebnis eines Retardationsversuchs ist die bleibende Verformung infolge der vorgegebenen konstanten Zugspannung bei konstanter Prüftemperatur. In Abbildung 6-2 sind exemplarisch die Ergebnisse der Retardationsversuche am AB 0/11 S bei

+5°C zusammengestellt. Durch Mittelwertbildung können die aufgrund von abweichenden Hohlraumgehalten zu erkennenden Prüfstreuungen eliminiert werden. Die gemittelten Dehnungsverläufe repräsentieren den temperatur- und spannungsabhängigen Dehnungsverlauf des geprüften Asphaltes. In Anlage 8 sind alle gemittelten Dehnungsverläufe der untersuchten Asphalte unter Angabe der mittleren gemessenen Zugspannung dargestellt.

6.2.1 Anpassung der Dehnungsmessung mittels Burgers-Modells

In Abbildung 6-3 sind die Dehnungsmesswerte während der 8-stündigen Belastungsphase sowie der Entlastungsphase der Retardationsversuche am AB 0/11 S bei einer Prüftemperatur von $T = -10^{\circ}\text{C}$ und einer Zugspannung von $\sigma = 1,694 \text{ MPa}$ dargestellt. Der Dehnungsverlauf während der Belastungsphase kann mathematisch unter Anwendung des Burgers-Modells approximiert werden. Die ermittelten Materialparameter E_1 , E_2 , λ_1 und λ_2 sowie die erreichten Bestimmtheitsmaße R^2 sind in Anlage 8 für jeden Versuch – zugeordnet zu den Prüfbedingungen Temperatur und Zugspannung sowie dem Hohlraumgehalt des jeweiligen Probekörpers – zusammengestellt. Für Ergebnisse mit gleichen Prüfbedingungen wurden Mittelwert, Standardabweichung sowie Variationskoeffizient berechnet.

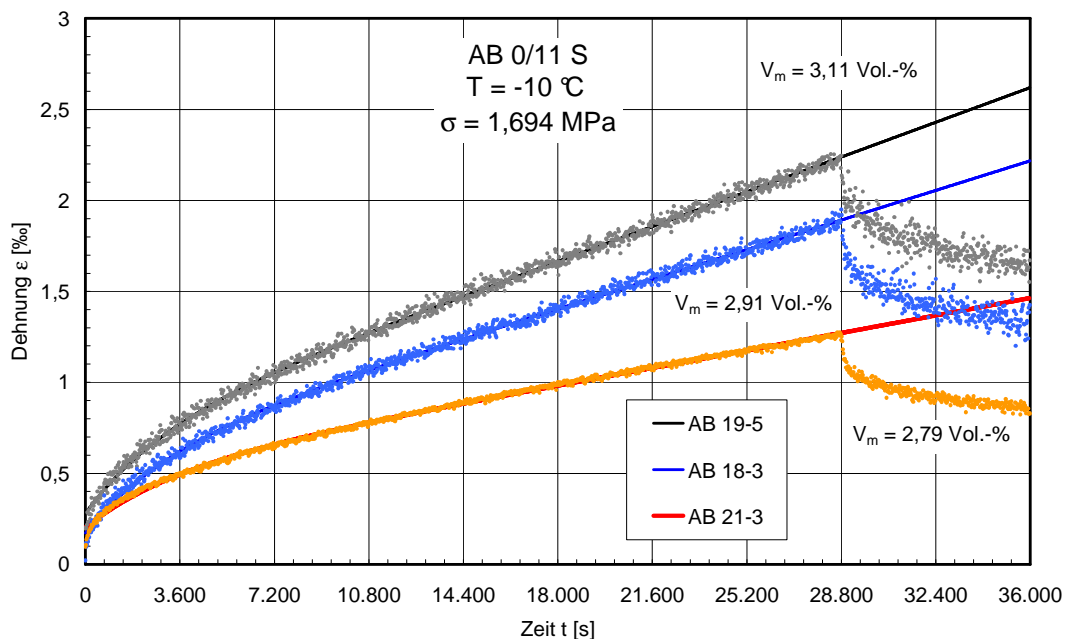


Abbildung 6-3: Retardationsversuche: Dehnungsverläufe und deren Beschreibung mittels Burgers-Modells (AB 0/11 S, $T = -10^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 1,694 \text{ MPa}$)

Abbildung 6-4 zeigt die Mittelwerte sowie die Bereiche der erreichten Bestimmtheitsmaße R^2 . Die vergleichsweise geringen Bestimmtheitsmaße β bei der Prüftemperatur $T = -25^\circ\text{C}$ sind auf die großen relativen Streuungen der Messwerte zurückzuführen (vgl. Anlage 8). Besonders bei den Versuchen am ATS 0/32 CS liegen die gemessenen Verformungen im Bereich der Messgenauigkeit der Prüfeinrichtung, sodass nur geringe Bestimmtheitsmaße β erreicht wurden.

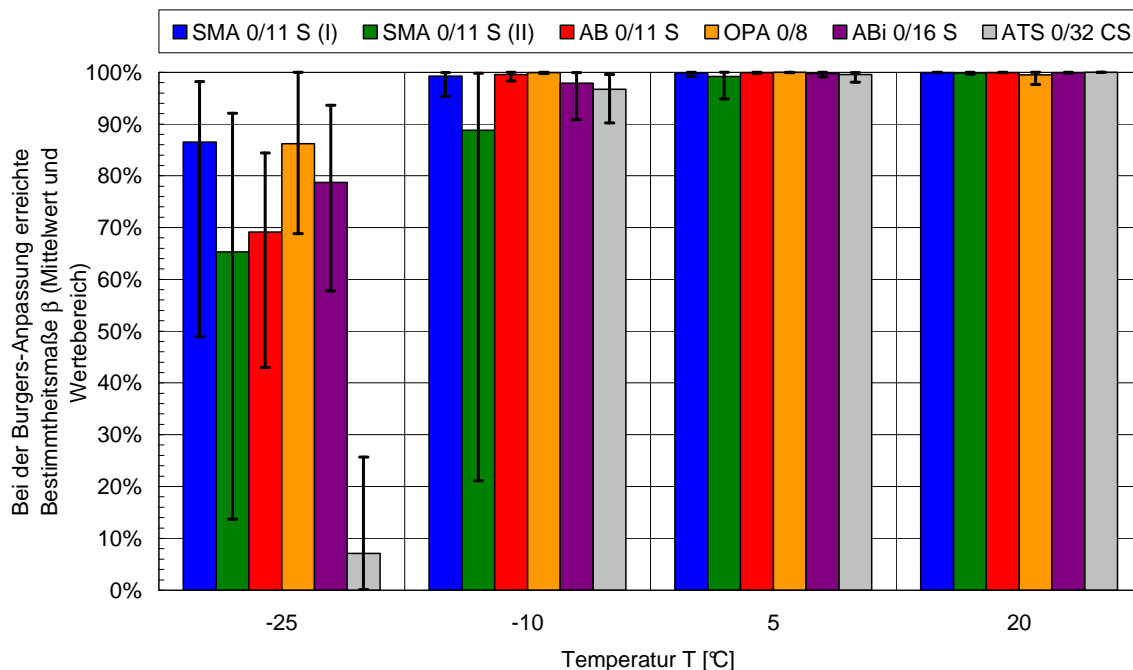


Abbildung 6-4: Bestimmtheitsmaße, die bei der Anpassung des Burgersmodells an die Dehnungsmessungen im Retardationsversuch erreicht wurden

In Abbildung 6-5 sind die ermittelten Materialparameter E_1 , E_2 , λ_1 und λ_2 aller untersuchten Asphalte in Abhängigkeit von der aufgetragenen Zugspannung dargestellt.

Die Materialkenngrößen zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Prüftemperatur und der im Versuch aufgetragenen Zugspannung. Die Spannungsabhängigkeit aller vier Burgers-Elemente kann nach [6] durch einen linearen Zusammenhang mit logarithmiertem Argument beschrieben werden (Gln. 6.1 und 6.2).

$$\log(E_1, E_2, \lambda_1, \lambda_2) = a_i + b_i \cdot \sigma \quad \text{Gleichung 6.1}$$

$$\text{oder } (E_1, E_2, \lambda_1, \lambda_2) = 10^{a_i + b_i \cdot \sigma} \quad \text{Gleichung 6.2}$$

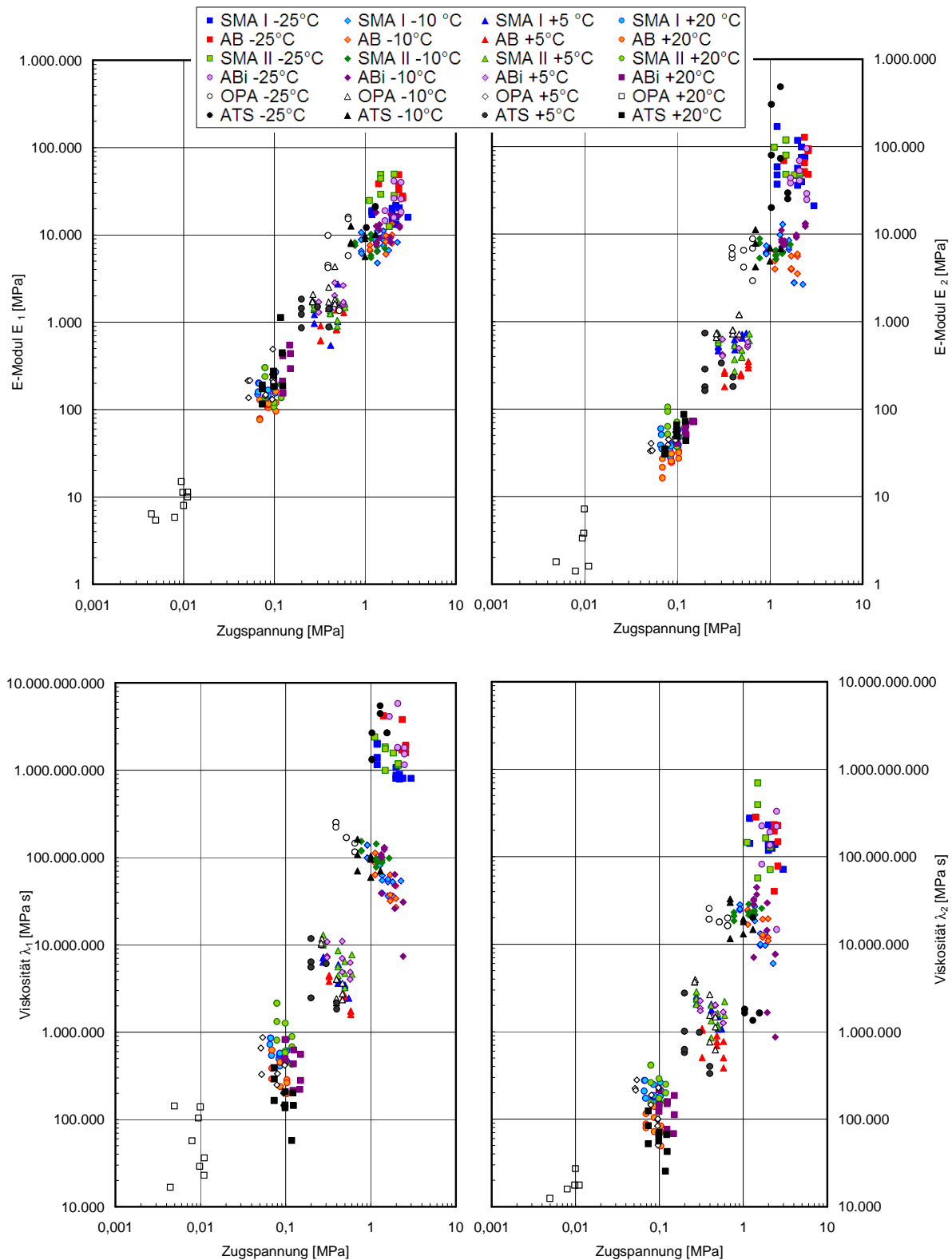


Abbildung 6-5: Burgers-Modellparameter E_1 , E_2 , λ_1 , und λ_2 in Abhängigkeit von der Zugspannung σ und der Prüftemperatur T

Durch Fehlerquadratminimierung können die Konstanten a_i und die Koeffizienten b_i ermittelt werden. In Tabelle 6.1 sind die den Spannungseinfluss auf die Burgers-Elemente beschreibenden Regressionsparameter a_i und b_i in Abhängigkeit von der Prüftemperatur zusammengefasst.

Tabelle 6.1: Regressionsparameter zur Berechnung der Burgers-Parameter in Abhängigkeit von der Zugspannung σ

	T	$E_1 = 10^{a_{E_1} + b_{E_1} \cdot \sigma}$			$E_2 = 10^{a_{E_2} + b_{E_2} \cdot \sigma}$			$\lambda_1 = 10^{a_{\lambda_1} + b_{\lambda_1} \cdot \sigma}$			$\lambda_2 = 10^{a_{\lambda_2} + b_{\lambda_2} \cdot \sigma}$		
		[MPa]			[MPa]			[MPas]			[MPas]		
		a	b	R ²	a	B	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
SMA 0/11 S (I)	+20	2,14	0,97	5,7	1,65	-0,24	0,5	6,03	-2,86	39,9	5,44	-1,37	1,37
	+5	2,94	0,50	26,7	2,54	0,54	87,7	7,28	-1,57	98,8	6,65	-1,01	1,01
	-10	3,88	0,02	5,8	4,19	-0,30	28,7	8,47	-0,49	87,8	7,85	-0,45	0,45
	-25	4,30	-0,03	94,5	4,55	0,10	35,9	9,51	-0,27	99,6	8,54	-0,15	0,15
SMA 0/11 S (II)	+20	2,70	-4,85	55,5	2,18	-4,35	62,7	6,81	-9,44	92,5	5,81	-4,60	79,9
	+5	3,15	-0,10	1,8	2,71	-0,01	0,02	7,29	-0,95	50,0	6,41	-0,45	19,1
	-10	3,93	-0,05	91,2	3,98	-0,16	71,9	8,24	-0,25	99,4	7,25	0,10	67,2
	-25	4,84	-0,24	6,8	5,16	-0,23	72	9,60	-0,24	82,6	9,39	-0,62	98,3
AB 0/11 S	+20	1,74	3,62	99,3	1,05	4,44	99,0	6,12	-7,10	81,1	5,28	-4,13	50,7
	+5	2,47	1,17	97,6	2,20	0,53	75,0	7,12	-1,51	98,6	6,19	-0,72	82,3
	-10	3,61	0,19	87,7	3,72	-0,02	11,0	8,46	-0,46	98,8	7,60	-0,24	93,7
	-25	5,66	-0,46	96,3	4,85	0,02	21,7	10,13	-0,33	95,3	8,53	-0,14	95,8
OPA 0/11	+20	1,17	-11,95	84,0	0,64	-23,57	92,3	7,58	-289,00	99,6	4,28	-9,63	44,9
	+5	2,08	2,80	18,0	1,37	3,39	92,7	6,34	-10,69	88,9	5,82	-8,02	84,3
	-10	3,08	0,63	60,7	2,64	0,75	77,5	7,79	-3,04	88,5	7,30	-2,72	99,9
	-25	3,08	1,15	9,5	3,75	0,04	0,02	8,80	-1,10	99,7	0,45	-0,34	84,7
ABi 0/16 S	+20	1,64	6,55	97,2	1,26	4,02	99,9	6,20	-4,47	96,9	5,44	-2,45	86,6
	+5	3,01	0,56	64,2	2,64	0,22	35,6	7,20	-0,81	83,3	6,46	-0,51	77,2
	-10	3,95	0,07	71,8	3,68	0,17	88,4	8,90	-0,64	91,3	8,51	-0,72	87,8
	-25	3,81	0,27	76,3	4,48	0,10	42,4	12,74	-1,46	93,0	7,99	0,11	76,8
ATS 0/32 CS	+20	1,30	11,77	93,5	1,06	6,55	93,2	5,93	-6,80	94,4	5,39	-6,00	99,4
	+5	3,22	-0,33	32,3	2,79	-1,10	77,1	7,40	-2,57	79,4	6,68	-2,65	89,0
	-10	3,93	0,04	5,6	3,94	-0,10	39	8,29	-0,35	99,3	7,64	-0,38	92,7
	-25	5,13	0,22	0,38	6,74	-1,34	45,1	9,01	0,34	15,6	6,57	-0,06	0,1

In zahlreichen Fällen werden nur geringe Bestimmtheitsmaße erreicht. Bei tiefen Temperaturen liegen die aufgrund der hohen Steifigkeit des Asphaltes sehr geringen Wegänderungen im Bereich der Genauigkeit der Wegmesseinrichtung, sodass die Messwerte stark streuen und somit auch die durch Anpassung ermittelten Burgers-

Parameter hohe Abweichungen aufweisen können. Des Weiteren treten die geringen Bestimmtheitsmaße häufig in Kombination mit kleinen Faktoren b_i zusammen auf, die auf eine geringe Beeinflussung des Burgers-Parameters durch die Spannung hindeuten. Je geringer dieser Einfluss ist, desto stärker wird das Bestimmtheitsmaß durch die Streuung der Messwerte reduziert.

6.2.2 Temperaturabhängigkeit der Burgers-Elemente

Die in Tabelle 6.1 zusammengestellten Regressionsparameter zur Berechnung der Burgers-Elemente in Abhängigkeit von der Spannung weisen eine Abhängigkeit von der Prüftemperatur auf.

In Abbildung 6-6 sind die Regressionsparameter a_{E1} für alle untersuchten Asphalte in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen. Zusätzlich sind die Ergebnisse der in [6] veröffentlichten Retardationsversuche ergänzt (AB 0/11, GA 0/11, SMA 0/11 S (alt)). Deutlich ist zu erkennen, dass die Parameter a_{E1} , die die spannungsunabhängigen Teile der Anpassungsfunktionen für die in Reihe geschaltete Elastizität darstellen, mit ansteigender Temperatur linear abnehmen und somit durch Geradengleichungen beschrieben werden können.

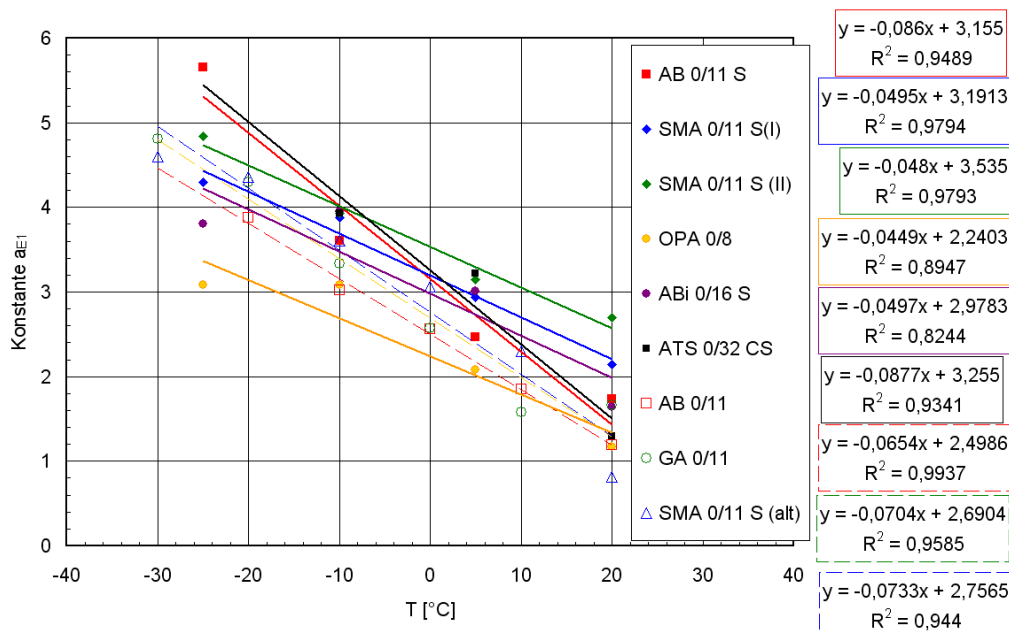


Abbildung 6-6: Konstanten a_{E1} zur Beschreibung der Spannungsabhängigkeit des Burgers-Elementes E_1 in Abhängigkeit von der Temperatur T

In Abbildung 6-7 sind zusätzlich die verwendeten Bindemittelsorten der Asphaltvarianten angegeben. Das Bindemittel der alten Klassifikation B 65 wurde dazu den Bindemitteln der aktuellen Klassifikation 50/70 zugeordnet. Tendenziell ist zu erkennen, dass bei den zur Beschreibung der Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 ermittelten Koeffizienten s_i die Asphalte mit PmB 45 A ähnlich hohe Werte annehmen. Die Asphalte mit einem Straßenbaubitumen 50/70 weisen höhere Beträge für s_i auf. Der Einfluss der Temperatur auf die resultierenden Burgers-Elemente ist höher als bei Asphalten mit modifizierten Bindemitteln.

In Abbildung 6-8 sind die Konstanten r_i aufgetragen. Diese entsprechen den Regressionsfaktoren a_i bei einer Temperatur von $T = 0^\circ\text{C}$. Deutlich fallen die geringen Werte des OPA 0/8 auf. Diese können auf dessen hohen Hohlraumgehalt und die daher niedrigen Steifigkeitskennwerte (Elastizität und Viskosität) zurückgeführt werden. Die Asphalte mit unmodifizierten Bindemitteln zeigen eine einheitliche Reihung in Abhängigkeit von der Bindemittelviskosität, wobei die Asphalte mit relativ niedrig viskosen Bindemitteln (hohe Penetrationskennwerte) entsprechend zu geringen Steifigkeitskennwerten neigen. Dies ist bei der Betrachtung der identischen Temperatur ($T = 0^\circ\text{C}$) plausibel.

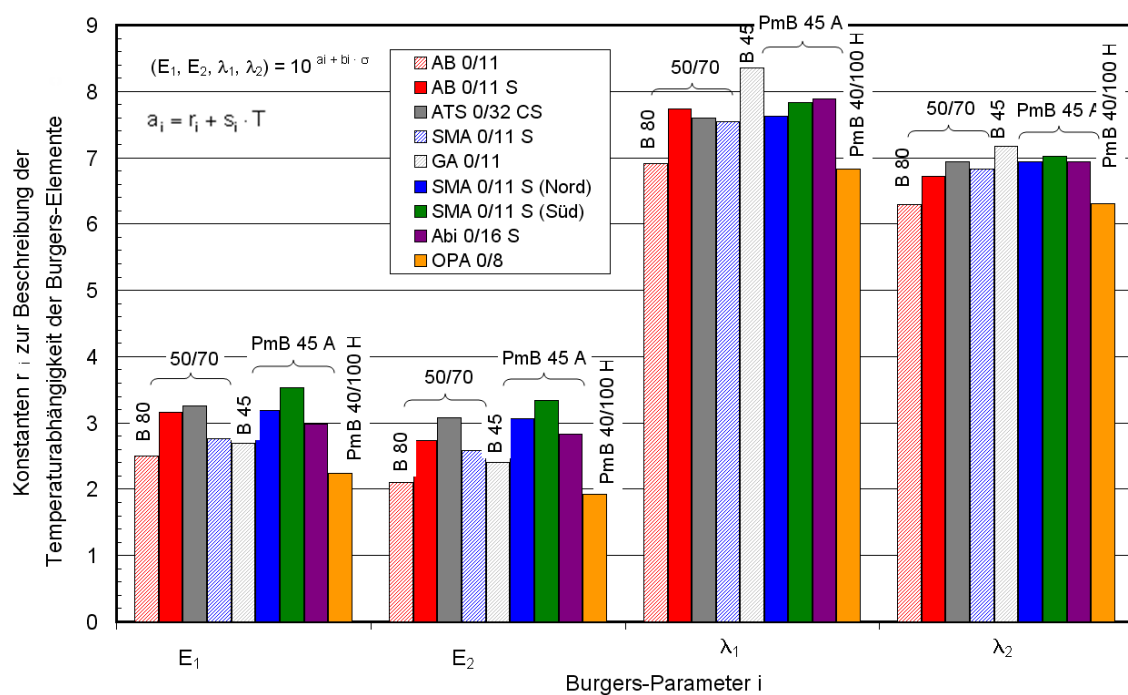


Abbildung 6-8: Regressionsfaktor r_i zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Burgers-Elemente; entspricht dem Faktor a_i bei einer Temperatur von $T = 0^\circ\text{C}$

Auch die Faktoren b_i , die die Abhängigkeit der Burgers-Elemente von der Spannung beschreiben, zeigen eine Abhängigkeit von der Temperatur, wie in Abbildung 6-9 für $b_{\lambda 1}$ verdeutlicht wird. Erneut sind die in [6] veröffentlichten Regressionswerte ergänzt.

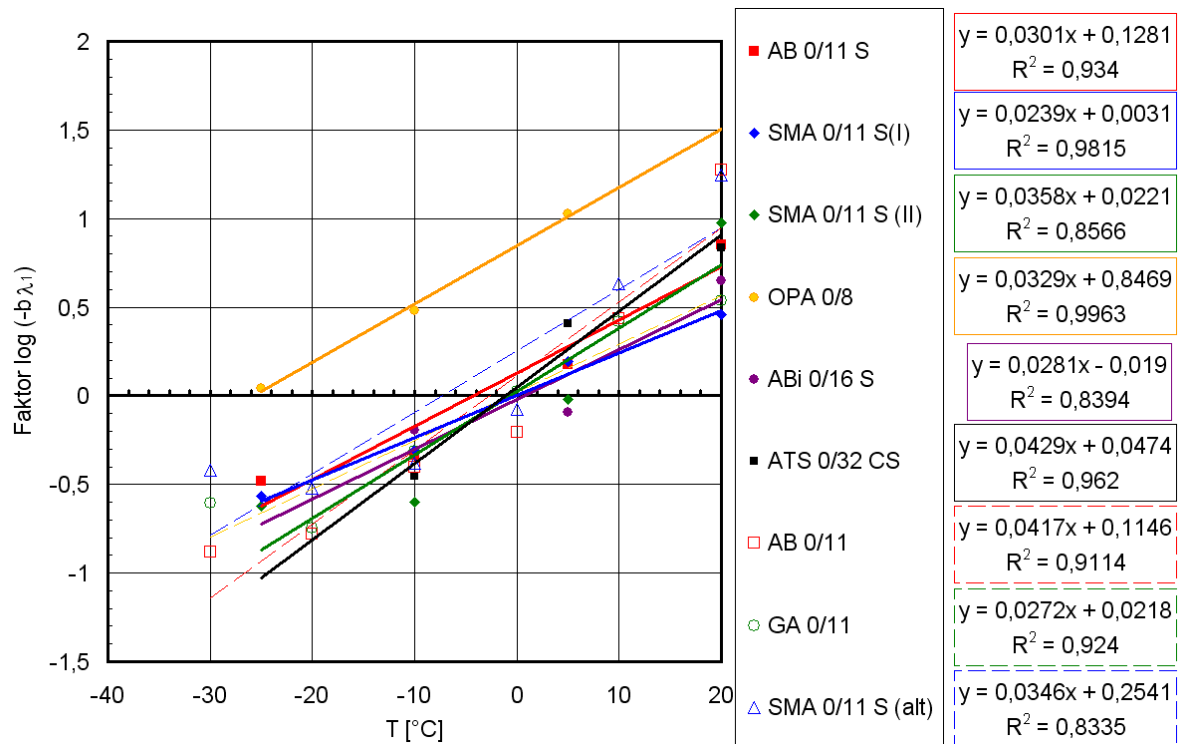


Abbildung 6-9: Temperaturabhängigkeit der Regressionsfaktoren $b_{\lambda 1}$, die den Einfluss der Spannung auf die Burgers-Elemente λ_1 der unterschiedlichen Asphalte beschreiben

Die Koeffizienten b_i zur Berechnung der Spannungsabhängigkeit der Viskositäten $b_{\lambda 1}$ und $b_{\lambda 2}$, die bei allen Temperaturen negative Werte annehmen – eine Spannungszunahme führt zu einer Reduktion der Viskositätskennwerte –, können mit Gleichung 6.4 beschrieben werden.

$$\log_{10}(-b_i) = p_i + q_i \cdot T \quad \text{Gleichung 6.4}$$

$$i = \lambda_1, \lambda_2$$

Die für die Anpassung der Viskositäten λ_1 und λ_2 gefundenen Regressionsfaktoren p , q , r und s sind in Tabelle 6.2 zusammengestellt.

Tabelle 6.2: Regressionsfaktoren zur Beschreibung der Viskositäten λ_1 und λ_2 in Abhängigkeit von der Temperatur T und der Spannung σ

	Viskosität λ_1 [MPas]				Viskosität λ_2 [MPas]			
	$\lambda_1 = 10^{\left(r_{\lambda_1} + s_{\lambda_1} \cdot T - \sigma \cdot 10^{(p_{\lambda_1} + q_{\lambda_1} \cdot T)}\right)}$				$\lambda_2 = 10^{\left(r_{\lambda_2} + s_{\lambda_2} \cdot T - \sigma \cdot 10^{(p_{\lambda_2} + q_{\lambda_2} \cdot T)}\right)}$			
	p_{λ_1}	q_{λ_1}	r_{λ_1}	s_{λ_1}	p_{λ_2}	q_{λ_2}	r_{λ_2}	s_{λ_2}
SMA 0/11 S (I)	0,0031	0,0239	7,6287	-0,0775	-0,2035	0,0216	6,9450	-0,0700
SMA 0/11 S (II)	0,0221	0,0358	7,8297	-0,0621	0,0361	0,0159	7,0220	-0,0772
AB 0/11 S	0,1281	0,0301	7,7347	-0,0891	-0,1687	0,0326	6,7140	-0,0744
OPA 0/8	0,8469	0,0329	6,8233	-0,0820	0,6826	0,0183	6,3033	-0,1007
ABi 0/16 S	-0,0190	0,0281	7,8833	-0,0900	-0,1039	0,0177	6,9383	-0,0647
ATS 0/32 CS	0,0474	0,0429	7,6000	-0,0787	0,0607	0,0399	6,9450	-0,0750

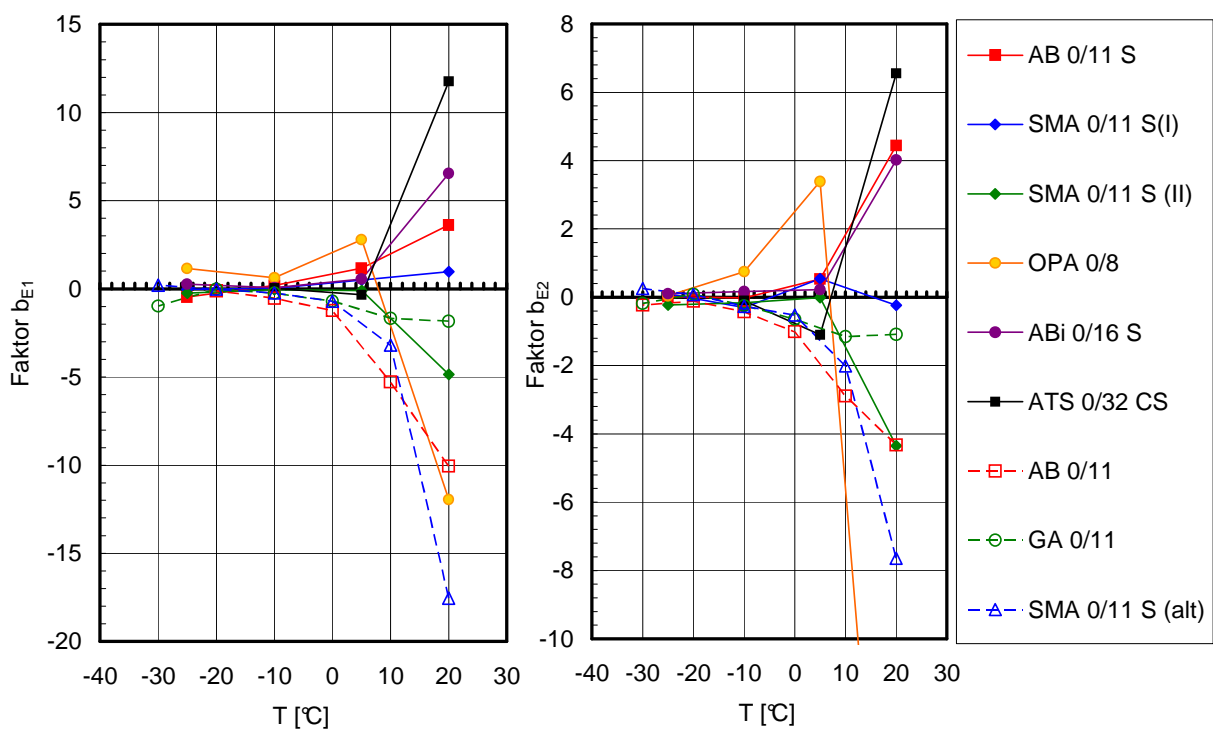


Abbildung 6-10: Temperaturabhängigkeit der Regressionsfaktoren b_{E1} und b_{E2} zur Beschreibung der Spannungsabhängigkeit der Elastizitätsmoduln E_1 und E_2

In Abbildung 6-10 sind die ermittelten Regressionsfaktoren b_{E1} und b_{E2} zur Beschreibung der Spannungsabhängigkeit der Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Während bei tiefen Temperaturen sehr geringe Steigungsbeträge vorliegen – der Einfluss der Spannung auf die Materialparameter ist sehr gering –, weisen sie bei Temperaturen $T > 0^\circ\text{C}$ höhere Beträge jedoch mit unterschiedlichen, zum Teil auch wechselnden, Vorzeichen auf. Bei einigen Asphaltvarianten (ATS 0/32 CS, ABi 0/16 S, AB 0/11 S) führt eine Zunahme

der Spannung, zu einer Zunahme der Elastizitätskennwerte, während die übrigen Asphaltvarianten eine Abnahme der Kennwerte aufweisen. Daher und wegen der bei der Ermittlung der Spannungsabhängigkeit eher geringen Bestimmtheitsmaße (vgl. Tabelle 6.1) erscheint es sinnvoll, die Elastizitätskennwerte unabhängig von der Spannung zu betrachten.

In Tabelle 6.3 sind die aus allen Versuchen unabhängig von der aufgetragenen Spannung ermittelten Mittelwerte der Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 und deren Standardabweichungen und Variationskoeffizienten aufgeführt.

Tabelle 6.3: Mittelwerte der ermittelten Elastizitätsmoduln E_1 und E_2

	T	E_1 [MPa]			E_2 [MPa]		
	[°C]	Mittelwert	St.abw.	Var.-Koeff.	Mittelwert	St.abw.	Var.-Koeff.
SMA 0/11 S (I)	+20	168	39,87	23,78	42	9,39	22,38
	+5	1.404	551,66	39,30	584	96,29	16,48
	-10	8.321	1.940,74	23,32	6.599	2.701,46	40,93
	-25	17.561	2.422,34	13,79	66.464	39.362,22	59,22
SMA 0/11 S (II)	+20	185,67	72,44	39,01	61,78	22,85	36,98
	+5	1.372,88	290,30	21,15	523,33	145,60	27,82
	0	2.830,62	210,05	7,42	1.433,75	145,73	10,16
	-5	4.369,36	873,00	19,98	3.107,88	193,06	6,21
	-10	7.526,88	1.430,49	19,01	6.481,11	1.165,34	17,98
	-15	11.626,79	1.654,34	14,23	13.603,83	1.384,75	10,18
	-25	32.045,87	14.187,36	44,27	66.360,82	29.079,79	43,82
AB 0/11 S	+20	111	26,11	23,61	26	5,30	20,03
	+5	1.060	553,81	52,23	268	49,71	18,53
	-10	8.510	2.279,75	26,79	4.890	1.045,13	21,37
	-25	29.367	10.286,46	35,03	79.695	24.425,23	30,65
OPA 0/11	+20	9,13	3,33	36,44	2,62	2,15	82,11
	+5	215,71	105,95	49,11	44,46	8,34	18,77
	-10	2.115,61	885,62	41,86	842,17	207,70	24,66
	-25	7.312,12	5.803,32	79,37	5.942,49	1.815,11	30,54
ABi 0/16 S	+20	295,73	138,32	46,77	58,46	12,83	21,94
	+5	1.858,56	545,89	29,37	545,40	96,03	17,61
	-10	12.088,22	3.577,50	29,59	9.703,83	2.061,63	21,25
	-25	25.165,61	10.513,28	41,78	49.243,17	22.975,28	46,66
ATS 0/32 CS	+20	327,59	315,84	96,42	52,67	19,38	36,80
	+5	1.311,94	349,92	26,67	302,33	202,76	67,07
	-10	9.072,52	2.158,10	23,79	6.974,79	2.267,88	32,52
	-25	650.899,95	601.347,34	92,39	145.310,19	179.449,40	123,49

Die Logarithmen der aufgeführten Elastizitätsmodul-Mittelwerte sind in Abbildung 6-11 in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Der Einfluss der Temperatur auf den Logarithmen der Elastizitätsmodul-Werte kann vereinfacht durch Geradengleichungen (vgl. Gleichung 6.5 und 6.6) beschrieben werden.

$$\log_{10}(E_1) = u_{E_1} \cdot T + v_{E_1} \quad \text{Gleichung 6.5}$$

$$\log_{10}(E_2) = u_{E_2} \cdot T + v_{E_2} \quad \text{Gleichung 6.6}$$

Die Anpassungsfaktoren und die dabei erreichten Bestimmtheitsmaße sind in Tabelle 6.4 aufgeführt.

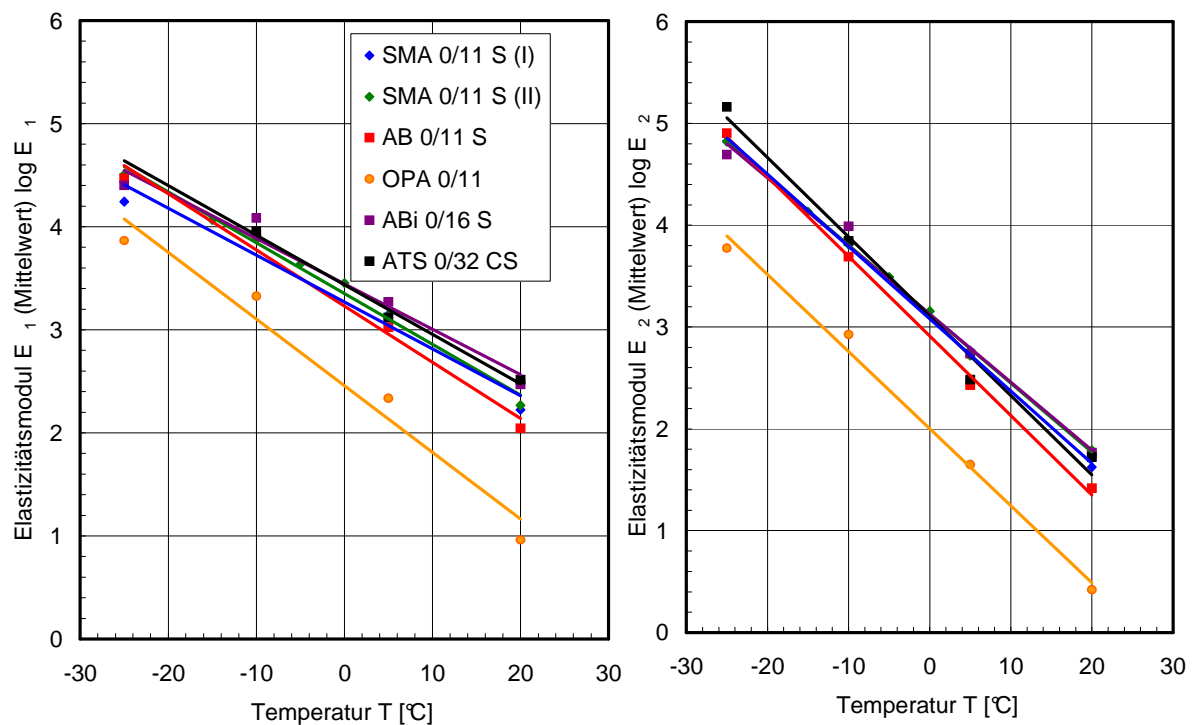


Abbildung 6-11: Logarithmen der spannungsunabhängigen Mittelwerte der Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 in Abhängigkeit von der Temperatur T

Tabelle 6.4: Faktoren der Geradengleichungen zur Beschreibung der Logarithmen der Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 in Abhängigkeit von der Temperatur T

	Elastizitätsmodul E_1 [MPa]			Elastizitätsmodul E_2 [MPa]		
	$\log_{10}(E_1) = u_{E_1} \cdot T + v_{E_1}$			$\log_{10}(E_2) = u_{E_2} \cdot T + v_{E_2}$		
	u_{E_1}	v_{E_1}	β [%]	u_{E_2}	v_{E_2}	β [%]
SMA 0/11 S (I)	-0,0455	3,2705	96,1	-0,071	3,0804	99,9
SMA 0/11 S (II)	-0,0492	3,3527	99,0	-0,0678	3,1275	99,9
AB 0/11 S	-0,0545	3,2309	98,4	-0,0781	2,9131	99,8
OPA 0/8	-0,0647	2,4593	96,4	-0,0756	2,0023	99,3
ABi 0/16 S	-0,044	3,4458	96,9	-0,0668	3,1286	99,0
ATS 0/32 CS	-0,0481	3,4371	99,1	-0,0779	3,1072	98,6

Die Berechnung der Dehnungsreaktion infolge einer konstanten Spannung kann mit Gleichung 6.1 unter Verwendung der in Tabelle 6.1 aufgeführten Regressionswerte

erfolgen. Für Temperaturen, bei denen keine Retardationsversuche durchgeführt wurden, kann der Dehnungsverlauf mit Gleichung 6.7 berechnet werden.

$$\varepsilon_{\text{Burgers}}(t) = \frac{\sigma}{E_1(T)} + t \cdot \frac{\sigma}{\lambda_1(T, \sigma)} + \frac{\sigma}{E_2(T)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_2(T)}{\lambda_2(T, \sigma)} \cdot t} \right) \quad \text{Gleichung 6.7}$$

mit: $E_1 = 10^{u_{E1} \cdot T + v_{E1}}$

$$E_2 = 10^{u_{E2} \cdot T + v_{E2}}$$

$$\lambda_1 = 10^{\left(r_{\lambda1} + s_{\lambda1} \cdot T - \sigma \cdot 10^{(p_{\lambda1} + q_{\lambda1} \cdot T)} \right)}$$

$$\lambda_2 = 10^{\left(r_{\lambda2} + s_{\lambda2} \cdot T - \sigma \cdot 10^{(p_{\lambda2} + q_{\lambda2} \cdot T)} \right)}$$

u_{E1} ; v_{E1} ; u_{E2} ; v_{E2} gemäß Tabelle 6.4

$p_{\lambda1}$; $q_{\lambda1}$; $r_{\lambda1}$; $s_{\lambda1}$; $p_{\lambda2}$; $q_{\lambda2}$; $r_{\lambda2}$; $s_{\lambda2}$ gemäß Tabelle 6.2

Im folgenden Kapitel wird untersucht, ob die gefundenen spannungs- und temperaturabhängigen Parameter der Elemente des Burgers-Modells zur Berechnung der akkumulierten bleibenden Dehnung im Zug-Schwellversuch verwendet werden können. Wurden sowohl Retardations- als auch Zug-Schwellversuche bei gleicher Prüftemperatur durchgeführt, kann Gleichung 6.1 direkt verwendet werden. Für Temperaturen, bei denen keine Retardationsversuche durchgeführt wurden und für die Tabelle 6.1 keine rheologischen Kennwerte enthält, muss Gleichung 6.7 verwendet werden.

6.3 Bleibende Dehnungen infolge statischer und dynamischer Belastung

Die Ergebnisse der Zug-Schwellversuche zeigen, dass der zeitliche Verlauf der bleibenden Dehnung unabhängig von der Prüffrequenz ist (vgl. Kapitel 6.1). In Abbildung 6-12 sind die Spannungsverläufe zweier Zug-Schwellversuche mit gleicher Unterspannung und Spannungsdifferenz bei unterschiedlichen Frequenzen dargestellt. Die Fläche zwischen der Abszisse und der Spannungsfunktion hat in beiden Fällen den gleichen Betrag. Diese Fläche entspricht der grau unterlegten Rechteckfläche unter einer konstanten Spannung der Größe σ_m , wie sie auch in Retardationsversuchen zur Anwendung kommt.

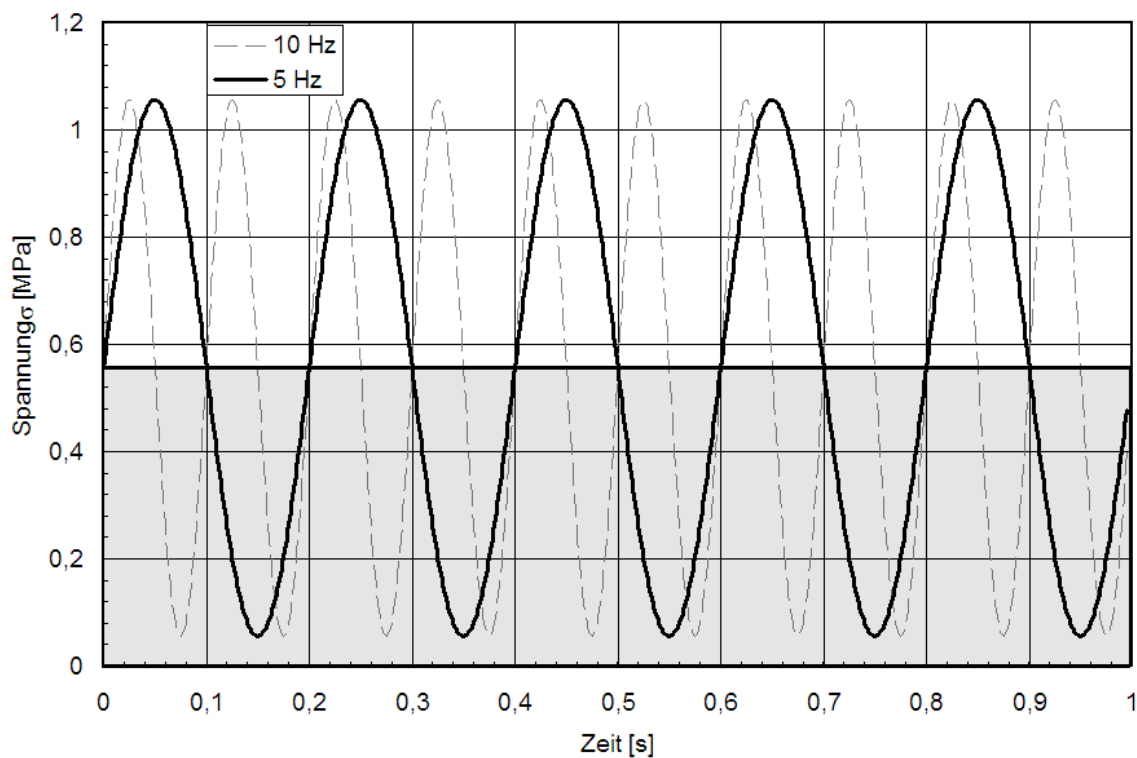


Abbildung 6-12: Mittlere Spannung σ_m zweier Zug-Schwellversuche mit unterschiedlichen Frequenzen

Mit Hilfe der in Tabelle 6.1 zusammengestellten Parameter zur Berechnung der spannungsabhängigen Parameter des Burgers-Modells – gewonnen aus den Retardationsversuchen – kann der Dehnungsverlauf infolge einer beliebigen konstanten Spannung mit Gleichung 6.8 berechnet werden. Als konstante Spannung kann die im axialen Zug-Schwellversuch wirkende mittlere Spannung σ_m für die Berechnung der Dehnung verwendet werden.

$$\varepsilon_{\text{Burgers}}(t) = \frac{\sigma_m}{E_1(\sigma_m)} + t \cdot \frac{\sigma_m}{\lambda_1(\sigma_m)} + \frac{\sigma_m}{E_2(\sigma_m)} + \left(1 - e^{-\frac{E_2(\sigma_m)}{\lambda_2(\sigma_m)} t} \right) \quad \text{Gleichung 6.8}$$

mit: $\sigma_m = \sigma_u + \Delta\sigma/2$: Mittlere Spannung im Zug-Schwellversuch [MPa]

$E_1(\sigma_m)$, $E_2(\sigma_m)$, $\lambda_1(\sigma_m)$, $\lambda_2(\sigma_m)$ gemäß Gleichung 6.1

In Abbildung 6-13 sind zu den in einaxialen Zug-Schwellversuchen gemessenen akkumulierten bleibenden Dehnungen die mittels Gleichung 6.8 berechneten Dehnungsverläufe eines durch konstante Spannungen belasteten Burgers-Modells ergänzt. Zu erkennen ist, dass der Dehnungsverlauf in den Zug-Schwellversuchen vor Auftreten der Wendepunkte durch die berechnete Kurve gut wiedergegeben wird. Bei hohen Lasten führt die Schädigung in den axialen Zug-Schwellversuchen dazu, dass der mittels Burgers-Modell berechnete Dehnungsverlauf deutlich unterhalb der tatsächlich gemessenen Daten liegt.

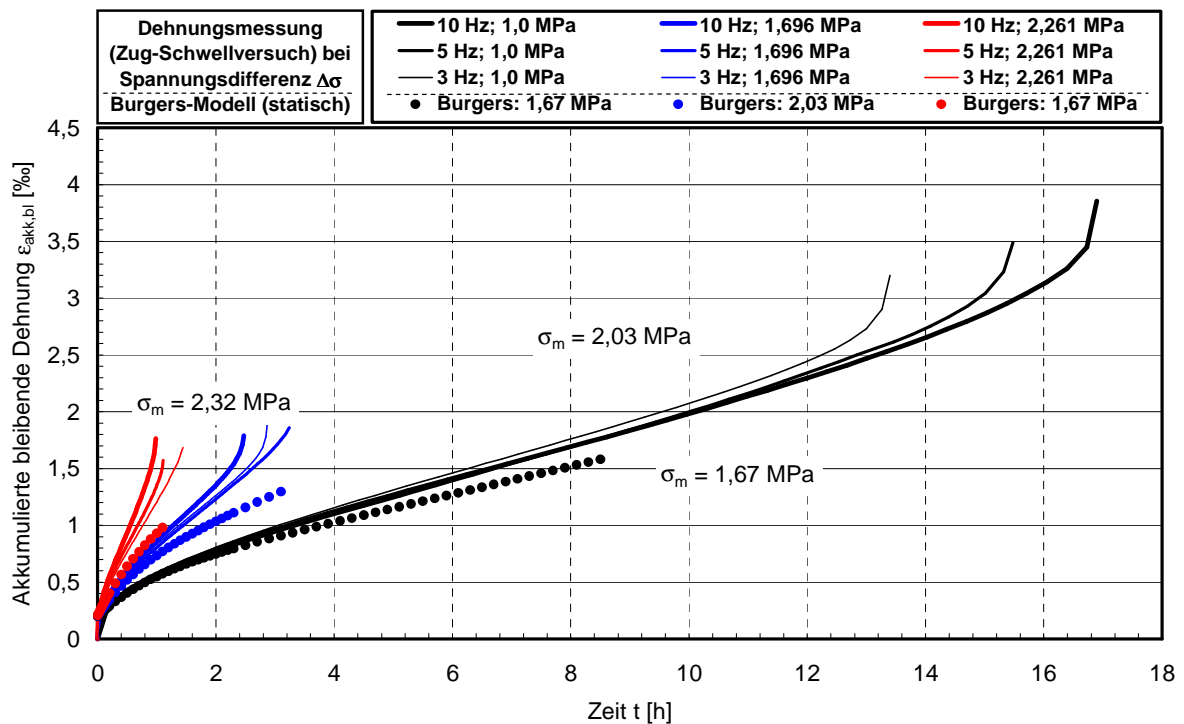


Abbildung 6-13: Akkumulierte bleibende Dehnung in Zug-Schwellversuchen und für konstante mittlere Spannungen mittels Burgers-Modell berechnete Dehnungsverläufe (AB 0/11 S, -10°C)

Daher wird im folgenden Kapitel versucht, die Materialschädigung infolge Ermüdungserscheinungen bei der Berechnung des Verlaufes der akkumulierten bleibenden Dehnung zu berücksichtigen.

6.4 Ergebnis: Bleibende Dehnung infolge Ermüdung

Neben dem Verlauf der bleibenden Dehnung wurde ebenso die Änderung des absoluten E-Moduls während der einaxialen Zug-Schwellversuche aufgenommen und ausgewertet (vgl. Kapitel 5.3). Unter der Annahme, dass die Steifigkeit des Materials selbst während des gesamten Zug-Schwellversuchs als konstant angesehen werden kann, muss die Abnahme des absoluten E-Moduls die Folge einer Schädigung des geprüften Probekörpers sein. Wird die unter Kapitel 2.5.4 erläuterte Theorie der Schädigung infolge Risswachstum angewendet, kann die Abnahme des absoluten E-Moduls durch den Anstieg der auf den geschwächten Querschnitt wirkenden Spannung erklärt werden. Die zu einem beliebigen Zeitpunkt wirkende Spannung $\sigma(t)$ kann demnach mit Gleichung 6.9 aus der zu Versuchsbeginn wirkenden (Soll-)Spannung σ_0 und dem zu Versuchsbeginn gemessenen absoluten E-Modul E_0 sowie dem zum Zeitpunkt t gemessenen reduzierten absoluten E-Modul $E(t)$ berechnet werden.

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \frac{E_0}{E(t)} \quad \text{Gleichung 6.9}$$

Die Reaktion eines durch die zeitabhängige effektive Spannung $\sigma(t)$ belasteten Burgers-Modells kann nicht mit Gleichung 6.8 berechnet werden, da sich während des Versuchs die Belastungsbedingungen ändern. Die auf den Restquerschnitt wirkende Spannung nimmt aufgrund der Rissbildung zu und beeinflusst damit die zum Lösen der Differentialgleichung notwendigen Randbedingungen. Zusätzlich verändern sich durch die anwachsende Spannung die Parameter der rheologischen Modellelemente. Vor allem die im Voigt-Kelvin-Modell „gespeicherte“ Belastungsgeschichte erfordert eine schrittweise Berechnung der Dehnungsreaktion des Burgers-Modells unter Berücksichtigung der Schädigung. Daher wird der Dehnungsverlauf mit der in Gleichung 2.6 vorgestellten Differentialgleichung inkrementell berechnet (vgl. Gleichung 6.10).

$$\begin{aligned}\varepsilon_i &= \varepsilon_{E,i} + \varepsilon_{\lambda_1,i} + \varepsilon_{\text{Voigt-Kelvin},i} \\ &= \frac{\sigma_i}{E_{1,i}} + \left(\varepsilon_{\lambda_1,i-1} + \frac{\sigma_i}{\lambda_{1,i}} \cdot dt \right) + \left(\varepsilon_{\text{Voigt-Kelvin},i-1} + \left(\frac{\sigma_i}{\lambda_{2,i}} - \frac{E_{2,i}}{\lambda_{2,i}} \cdot \varepsilon_{\text{Voigt-Kelvin},i-1} \right) \cdot dt \right)\end{aligned}$$

Gleichung 6.10

mit i, i-1: Zeitinkremente

$dt = t(i) - t(i-1)$ Dauer eines Zeitinkrementes

$\varepsilon_{\lambda_1,i}$: Dehnung des in Reihe geschalteten Dämpfers zum Zeitpunkt i

$\varepsilon_{\text{Voigt-Kelvin},i}$ Dehnung des Voigt-Kelvin-Modells zum Zeitpunkt i

σ_i Zum Zeitpunkt i wirkende Spannung

Abbildung 6-14 zeigt das Ergebnis dieser Berechnung für die Zug-Schwellversuche am AB 0/11 S bei einer Temperatur von -10°C. Zur Berechnung des Verlaufes der akkumulierten bleibenden Dehnung wurde zunächst die zu jedem Zeitpunkt t wirkende Spannung anhand der mittleren Abnahme der absoluten E-Moduln berechnet. Dabei wurden die Verläufe der absoluten E-Moduln aus den Zug-Schwellversuchen gleicher Spannung aber unterschiedlicher Frequenz zusammengefasst. In Abhängigkeit von der für den Zeitpunkt i ermittelten Spannung σ_i wurden die Kennwerte der Elemente im Burgers-Modell gemäß Gleichung 6.2 unter Berücksichtigung der in Tabelle 6.1 aufgeführten Werte verwendet.

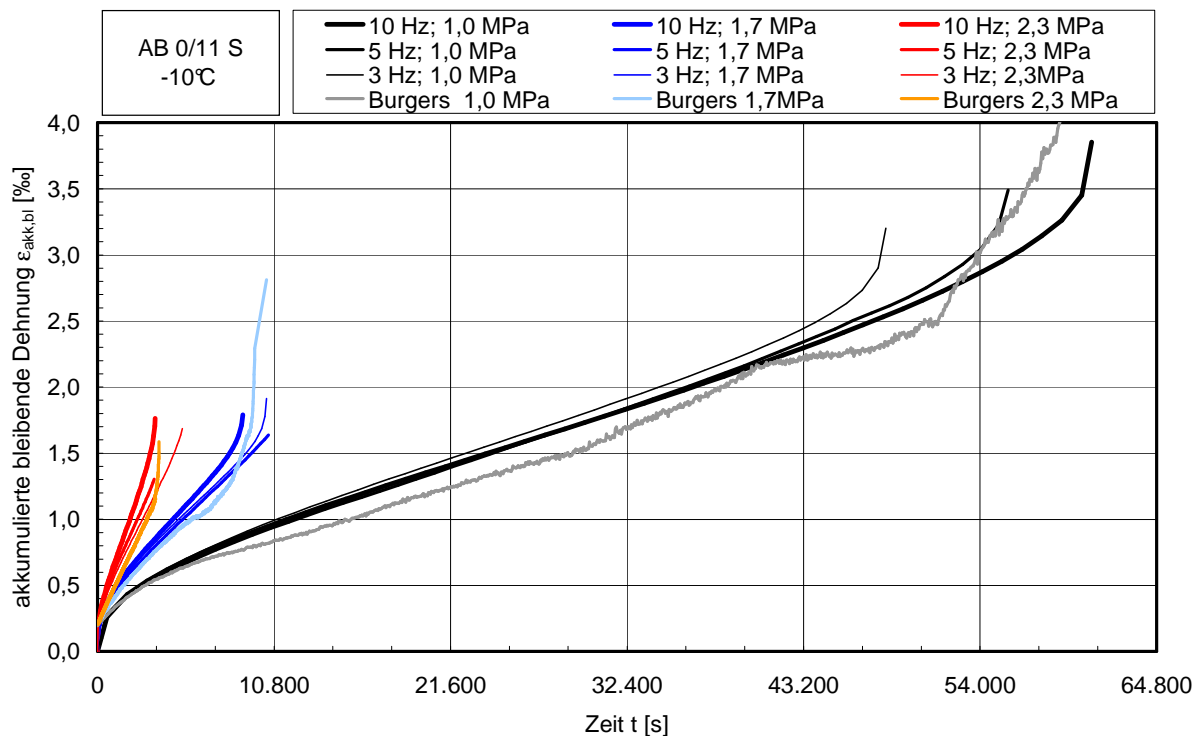


Abbildung 6-14: Berechnung des Verlaufs der bleibenden Dehnung in axialen Zug-Schwellversuchen unter Anwendung des Burgers-Modells mit einer aus dem Verlauf des absoluten E-Moduls berechneten Spannungszunahme infolge Schädigung (AB 0/11 S; -10°C)

Deutlich ist zu erkennen, dass die Dehnungsreaktion des Burgers-Elementes unter Berücksichtigung der Schädigung gut mit den in Zug-Schwellversuchen bei verschiedenen Frequenzen gemessenen Dehnungsverläufen übereinstimmt.

Auch für die Temperatur $T = +5^\circ\text{C}$ können die im Zug-Schwellversuch gemessenen Dehnungen des AB 0/11 S mittels Burgers-Modells unter Berücksichtigung der Schädigung nachvollzogen werden, wie Abbildung 6-15 zeigt.

Die Ausbildung eines Wendepunktes kann durch den durch Schädigung verursachten Anstieg der auf den tragenden Querschnitt wirkenden Spannung unter Benutzung des Burgers-Modells im Dehnungsverlauf beobachtet werden.

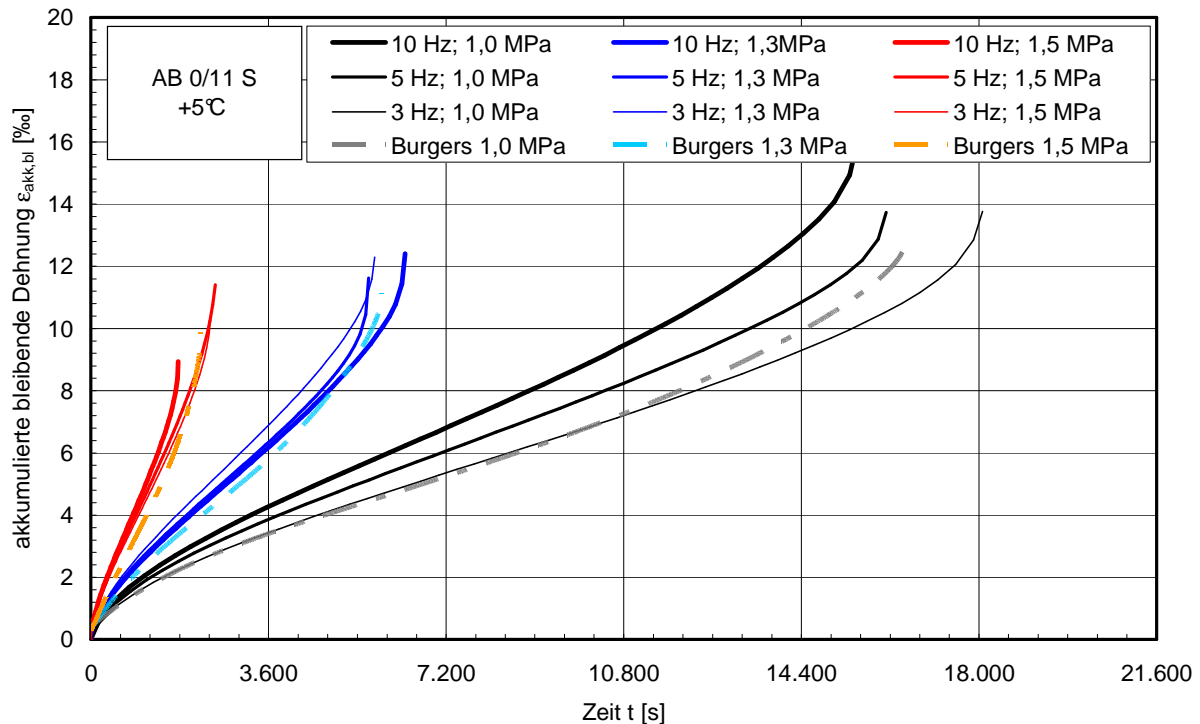


Abbildung 6-15: Berechnung des Verlaufs der bleibenden Dehnung in axialen Zug-Schwellversuchen unter Anwendung des Burgers-Modells mit einer aus dem Verlauf des absoluten E-Moduls berechneten Spannungszunahme infolge Schädigung (AB 0/11 S; +5°C)

Für die Berechnung der Dehnungsverläufe des geschädigten Burgers-Modells kamen die direkt aus den Ergebnissen der Retardationsversuche ermittelten Funktionen zur Berechnung der Modellelementkennwerte zur Anwendung, da für die Prüftemperaturen +5°C und -10°C sowohl Zug-Schwellversuche als auch Retardationsversuche durchgeführt wurden. In Abbildung 6-16 wurden die aus Zug-Schwellversuchen bei -15°C und -5°C gemittelten Dehnungsverläufe mit dem Burgers-Modell unter Berücksichtigung der Schädigung nachvollzogen, indem für die Berechnung der temperatur- und spannungsabhängigen Burgers-Kennwerte Gleichung 6.7 verwendet wurde. Für die Temperatur -15°C stimmen die gemessenen Dehnungen gut mit den berechneten überein, während bei der Temperatur -5°C die Berechnung zu deutlich niedrigeren Dehnungen führt als sie in den Versuchen tatsächlich gemessen wurden.

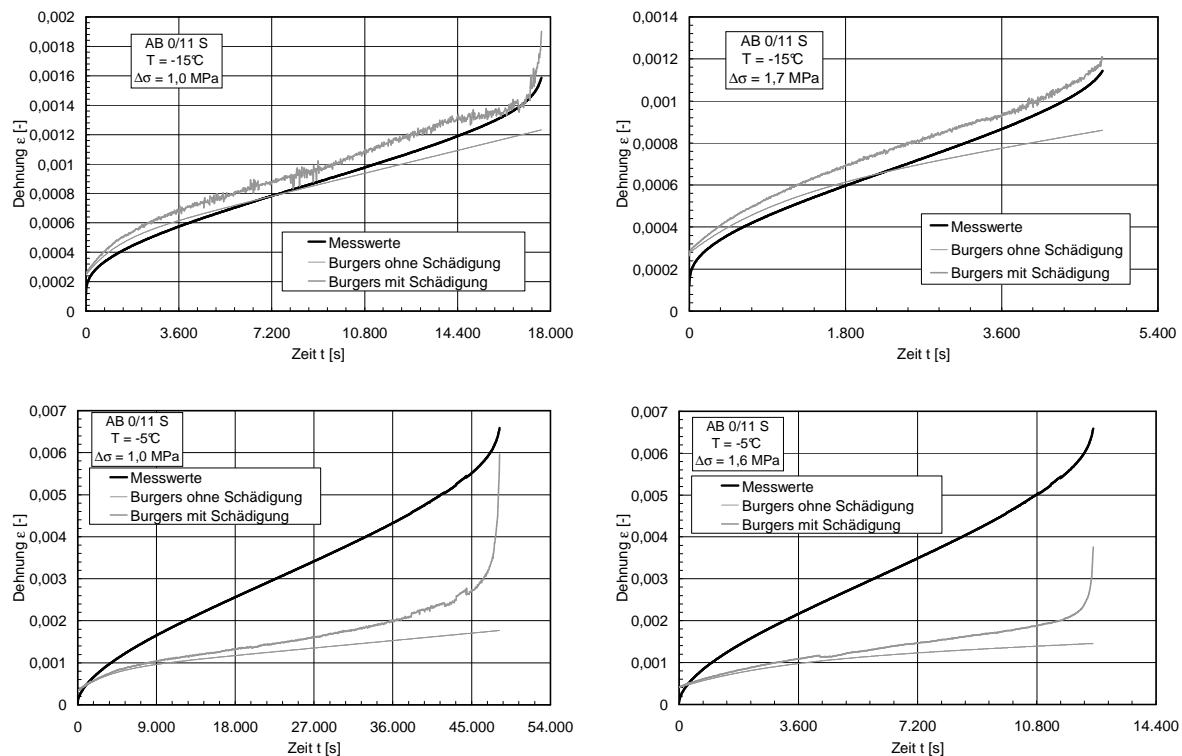


Abbildung 6-16 Übereinstimmung der am AB 0/11 S bei -15°C (oben) und -5°C (unten) gemessenen Dehnungsverläufe mit mittels Burgers-Modells unter Berücksichtigung der Schädigung berechneten Dehnungen; Berechnung der rheologischen Kennwerte in Abhängigkeit von der Temperatur (Gl. 6.7)

Abbildung 6-17 zeigt den Vergleich des in Zug-Schwellversuchen gemessenen Dehnungsverlaufs mit dem Verlauf der berechneten Dehnung eines Burgers-Modells unter Berücksichtigung der Schädigung. Für den blau dargestellten Dehnungsverlauf wurde die Spannungsabhängigkeit der rheologischen Elemente mit Gleichung 6.7 berechnet, während für den roten Verlauf die in Tabelle 6.1 aufgeführten Werte verwendet wurden. Die große Abweichung zwischen den beiden berechneten Dehnungsverläufen deutet darauf hin, dass die Verwendung von Gleichung 6.7 vor allem im höheren Temperaturbereich zu Fehlinterpretationen führen kann. Für die Ermittlung der Auswirkungen der Temperatur auf die Ausprägung der rheologischen Modellparameter sind offensichtlich noch weitere Untersuchungen notwendig.

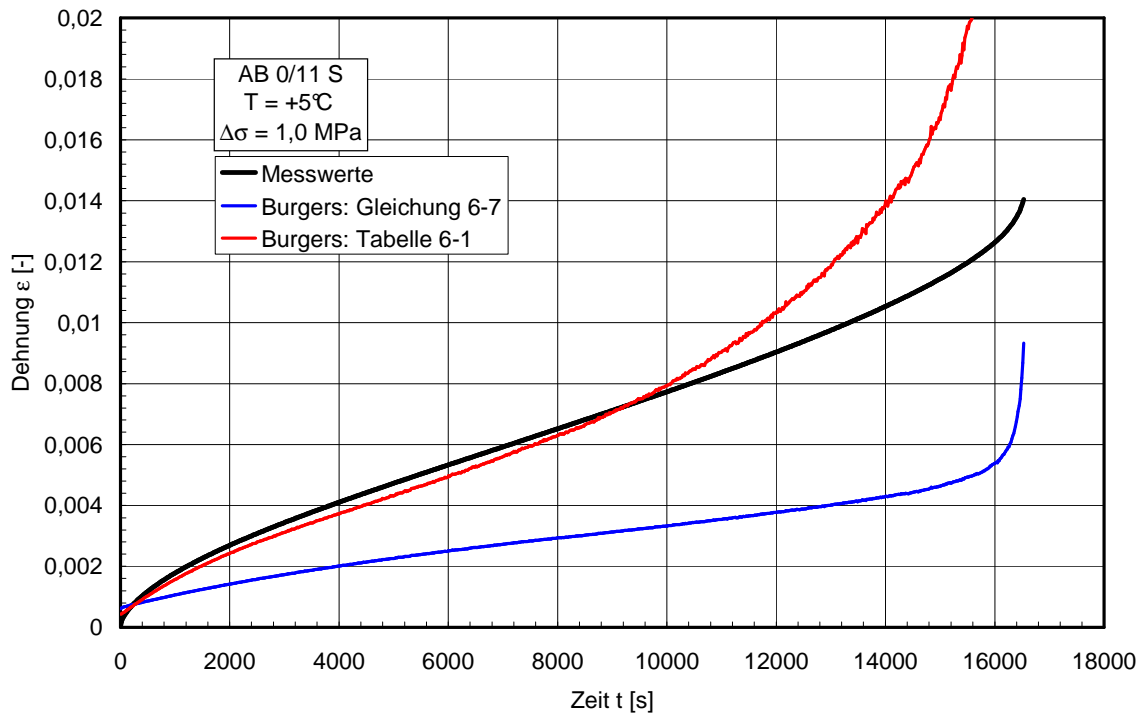


Abbildung 6-17 Vergleich der mit dem Burgers-Modells unter Berücksichtigung der Schädigung mit der mittels Retardationsversuche direkt ermittelten Spannungsabhängigkeit (rot) und der nach Gleichung 6.7 berechneten Spannungsabhängigkeit (blau) mit den Messergebnissen von Zug-Schwellversuchen

In Anlage 9 sind die mit dem Burgers-Modell unter Berücksichtigung der Schädigung berechneten Dehnungsverläufe im Vergleich zu den in Zug-Schwellversuchen gemessenen Verläufen für die anderen untersuchten Asphalte dargestellt. Die spannungsabhängigen rheologischen Modellparameter wurden mit den Werten gemäß Tabelle 6.1 berechnet. Bei den Berechnungen an OPA 0/8 und ATS 0/32 CS ergeben sich erhebliche Abweichungen zwischen den berechneten Dehnungsverläufen und den tatsächlich gemessenen Verformungen. So tritt bei den Simulationsrechnungen für den OPA 0/8 der Wendepunkt im Dehnungsverlauf sehr früh auf, sodass die prognostizierten Dehnungen die gemessenen weit überschreiten.

Die Ursache dafür ist in der Berechnung der spannungsabhängigen rheologischen Kennwerte zu suchen. So weisen die Versuchsergebnisse des OPA deutlich höhere Werte des Koeffizienten $b_{\lambda i}$ – der die Spannungsabhängigkeit der Viskositäten im Burgers-Modell beschreibt – auf als die der anderen Asphalte. Eine Erhöhung der effektiv wirkenden Spannung infolge Rissbildung bewirkt eine starke Abnahme der Viskositätsparameter, wodurch ein hoher Dehnungszuwachs erzeugt wird.

Die bei der ATS 0/32 CS zu beobachteten Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten können auf die durch das Größtkorn bedingten großen Messwert-Streuungen zurückgeführt werden, die bei den Retardations- und Zug-Schwellversuchen an diesem Material aufgetreten sind.

Die guten Übereinstimmungen zwischen den unter Berücksichtigung der Materialschädigung berechneten Verläufen der akkumulierten bleibenden Dehnung mit den Messwerten, wie sie am AB 0/11 S beobachtet werden konnten, werden auch beim SMA 0/11 S (II) und beim ABi 0/16 S bestätigt.

6.5 Schlussfolgerung

Mit Hilfe des Burgers-Modells kann der Dehnungsverlauf infolge einer konstanten Spannung berechnet werden, wobei die Parameter der vier rheologischen Einzel-elemente eine Abhängigkeit von der Höhe der wirkenden Spannung aufweisen.

In Zug-Schwellversuchen mit unterschiedlichen Belastungsfrequenzen ergeben sich einheitliche zeitabhängige Verläufe der akkumulierten bleibenden Dehnung. Zu Beginn der dynamischen Belastung liegen diese im Bereich der Dehnung des Burgers-Modells, das durch eine konstante Spannung in Höhe der mittleren Spannung σ_m der Zug-Schwellbelastung beansprucht wird. Im weiteren Verlauf bewirkt die Materialschädigung das Auftreten eines Wendepunktes im Dehnungsverlauf der Zug-Schwellversuche, der durch das Burgers-Modell nicht beschrieben werden kann.

Die dynamische Beanspruchung im Zug-Schwellversuch bewirkt eine Abnahme des absoluten E-Moduls des Probekörpers. Dieses anerkannte Ermüdungskriterium kann durch die fortschreitende Rissbildung im Probekörper erklärt werden. Durch die damit verbundene Abnahme des lastübertragenden Probekörper-Querschnitts steigt die Spannungsbeanspruchung des nicht geschädigten Teils der Querschnittsfläche.

Wird diese effektive Spannungszunahme bei der Anwendung des Burgers-Modells berücksichtigt, so erreicht der berechnete Dehnungsverlauf den Verlauf der in Zug-Schwellversuchen gemessenen akkumulierten bleibenden Dehnung.

Dies zeigt, dass der Aufbau viskoplastischer Dehnungen im Zug-Schwellversuch ebenso auf die ermüdungsbedingte Schädigung des Materials zurückzuführen ist wie die Abnahme des absoluten E-Moduls. Beide Merkmale sind somit messbare Auswirkungen der gleichen voranschreitenden Materialermüdung.

7 Zusammenfassung

Der Widerstand gegen Ermüdungsrisssbildung ist neben der Verformungsresistenz die Eigenschaft eines Asphaltbaustoffes, die die Dauerhaftigkeit der Befestigung maßgebend beeinflusst. Ermüdungsschäden treten in der Befestigung in Zonen auf, in denen der Asphalt durch hohe und wiederholt auftretende Zugspannungen beansprucht wird. Neben der hauptsächlich bei Durchbiegung unter der fahrenden Verkehrslast auftretenden mechanogenen Zugspannung werden Asphaltbefestigungen bei sinkenden Temperaturen durch kryogene Zugspannungen beansprucht. Somit können in den Wintermonaten durch das Wetter bedingte ungünstige Belastungsbedingungen auftreten, die bei gleichzeitig hoher Verkehrsbelastung zum Versagen der Asphaltbefestigung infolge Ermüdung führen können. Diese Schäden treten meist an der Oberseite der Asphaltbefestigung auf, da hier die höchsten Beanspruchungen aufgrund der höheren Temperaturschwankungen zu finden sind. Durch die entstandenen Risse kann Niederschlagswasser in die Asphaltbefestigung eintreten und somit die weiterführende Zerstörung der Befestigung einleiten.

Um im Vorfeld der Konstruktion einer Fahrbahnbefestigung die Resistenz eines Asphaltes gegen diese in der Praxis vorkommende Beanspruchung im Labor zu ermitteln und somit die Zusammensetzung des Baustoffs optimieren zu können, wurde der einaxiale Zug-Schwellversuch entwickelt [1]. Dieses Prüfverfahren überlagert die infolge Abkühlung auftretende konstante Zugspannung mit einer sinusförmig schwellenden Zugspannung. Die gewonnenen Ergebnisse können für die Prognose der Rissbildung in Asphaltbefestigungen und somit für deren Dimensionierung eingesetzt werden.

Für den Einsatz in Dimensionierungsmodellen wurden die ertragbaren Lastwechselzahlen in Abhängigkeit von der Temperatur, der Belastungsfrequenz und der Beanspruchung in einaxialen Zug-Schwellversuchen ermittelt. Aus den Ergebnissen wurden Ermüdungsfunktionen abgeleitet, mit denen die bei vorgegebener Temperatur und Frequenz ertragbare Lastwechselzahl aus der mechanogenen Zugspannung $\Delta\sigma$ mit hoher Präzision berechnet werden kann. In Abbildung 7-1 ist exemplarisch das aus den temperaturabhängigen Ermüdungsfunktionen für die Prüffrequenz von $f = 10 \text{ Hz}$ abgeleitete Dimensionierungsdiagramm eines Asphaltbeton AB 0/11 S gezeigt.

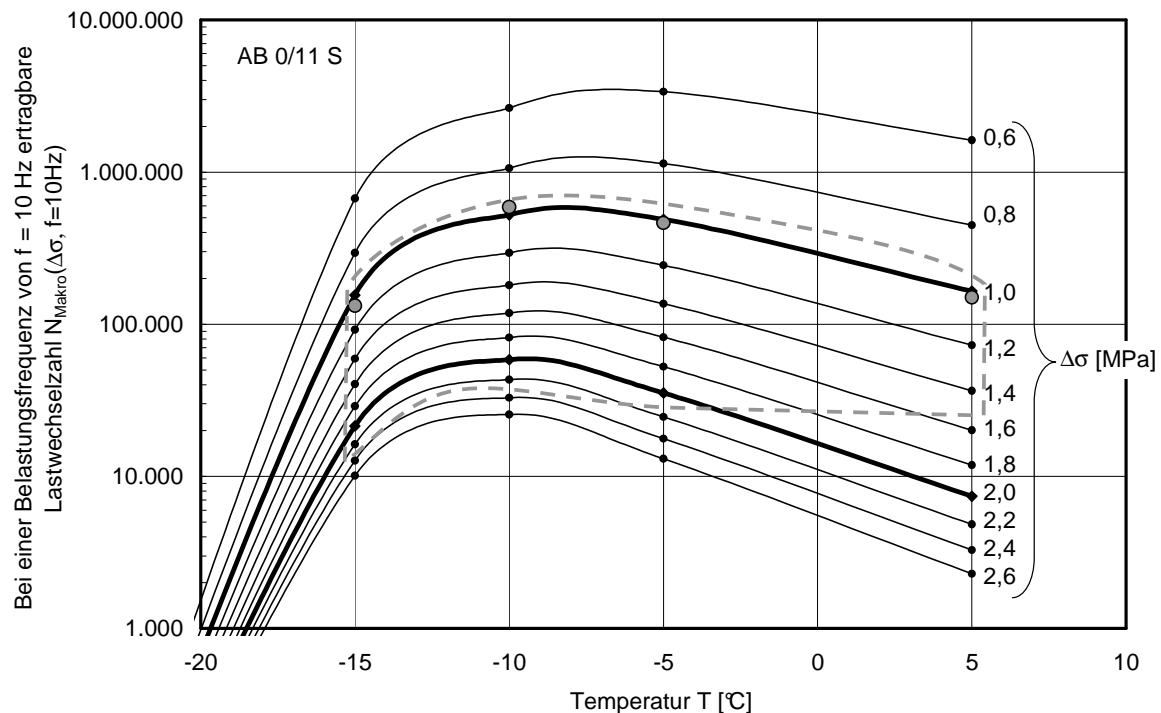


Abbildung 7-1: Anwendung der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen zur Berechnung der ertragbaren Lastwechselzahl für den AB 0/11 S

Bei der Auswertung der Versuche zeigte sich, dass die Materialschädigung, die sich sowohl in Rissbildung als auch im Verlauf der viskoelastischen und viskoplastischen Dehnung manifestiert, bei der Belastung mit hoher Frequenz langsamer fortschreitet als bei geringen Frequenzen. Alle drei Ermüdungskriterien zeigen dabei einen Einfluss der Dauer der Beanspruchung, der unabhängig von der Frequenz um untersuchten Bereich zwischen 3 Hz und 10 Hz ist. So tritt das Materialversagen bei Versuchen, in denen die Belastung mit hoher Frequenz aufgebracht wird, zum gleichen Zeitpunkt ein wie bei Versuchen mit geringerer Frequenz, bei denen folglich weniger Lastwechsel bis zum Versagenszeitpunkt eingetragen werden mussten. Somit kann die Frequenz in die Ermüdungsfunktionen (Gleichung 7.1) zur Berechnung der ertragbaren Lastwechselzahl in Abhängigkeit von der Beanspruchung einbezogen werden, was zum einen den notwendigen Prüfaufwand reduziert, da nur eine Frequenz im Labor untersucht werden muss. Zum anderen kann die Auswirkung unterschiedlicher Überrollungsgeschwindigkeiten, die in der Praxis vorkommen, in der Dimensionierung von Asphaltbefestigungen berücksichtigt werden. Der größere Schädigungseinfluss langsam fahrender Fahrzeuge ist bekannt und wird bereits heute bei der Dimensionierung z. B. von Steigungsstrecken berücksichtigt.

$$N_{\text{Makro}} = f \cdot T_1(T) \cdot \Delta\sigma^{T_2(T)} \quad \text{Gleichung 7.1}$$

mit: N_{Makro} : bis zum Makroriss ertragbare Lastwechselzahl
 $f = 1/t$: Frequenz oder Kehrwert der Belastungszeit eines Lastimpulses
 $\Delta\sigma$: Spannungsdifferenz = mechanogene Zugspannung
 $T_1(T)$: temperaturabhängiger Koeffizient der Ermüdungsfunktion
 $T_2(T)$: temperaturabhängiger Exponent der Ermüdungsfunktion

Trotz der Klärung des Einflusses der Belastungsfrequenz auf das Ermüdungsverhalten ist ein hoher Prüfaufwand notwendig, um auch den Einfluss der Temperatur bei der Dimensionierung berücksichtigen zu können. Daher wurde ein Konzept entwickelt, das die Ermittlung von temperaturabhängigen Ermüdungsfunktionen mit einem verringerten Prüfaufwand bei geringfügig verringerter Präzision ermöglicht.

Wie die Ergebnisse der Arbeit zeigen, besteht ein enger Zusammenhang zwischen der quasi-linearen Abnahme des absoluten E-Moduls ΔE und der bis zum Versagen des Probekörpers ertragbaren Lastwechselzahl N_{Makro} . Eine Nutzung dieses Kriteriums eröffnet die Möglichkeit, Ergebnisse der einaxialen Zug-Schwellversuche zu nutzen, bei dem die einzelnen Prüfungen nicht bis zum endgültigen Versagen des Probekörpers durchgeführt werden. Die Ermüdungsresistenz lässt sich dadurch auch bei geringen Beanspruchungen ermitteln, wodurch der Zeitaufwand für die Durchführung der Prüfung erheblich reduziert werden kann.

Durch die im einaxialen Zug-Schwellversuch eingesetzte Belastung mittels schwellenden Kraftsignals bewirkt die im Probekörper fortschreitende Materialermüdung neben der Vergrößerung der viskoelastischen Dehnung, die auch bei Ermüdungsversuchen mit anderen Beanspruchungen zur Auswertung herangezogen wird, zusätzlich den Aufbau von viskoplastischen Verformungen. In der internationalen Literatur wird dazu angemahnt, dass der herkömmlich zur Auswertung herangezogene Ermüdungseffekt – die Abnahme des Elastizitätsmoduls – durch den Aufbau großer Dehnungen überlagert und verfälscht wird.

Um zu zeigen, dass die im einaxialen Zug-Schwellversuch gemessene viskoplastische Dehnung ebenso aus der Materialermüdung resultiert wie das herkömmlich zur Auswertung herangezogene Kriterium der Elastizitätsmodul-Abnahme, wurde der Verlauf der viskoplastischen Dehnung mit Hilfe des Burgers-Modells berechnet. Für

die Ermittlung der vier benötigten Modellparameter (zwei Elastizitätsmoduln und zwei Viskositäten) wurden Retardationsversuche unter Variation der Temperatur und der Spannung durchgeführt. Die Parameter der vier rheologischen Elemente wurden durch Anpassung des berechneten Dehnungsverlaufs an die in den Retardationsversuchen gemessene Kriechkurve ermittelt. Der Einfluss der Temperatur und der Spannung auf die Modellparameter konnte funktional beschrieben werden.

Durch die Berücksichtigung der aus dem Verlauf der absoluten E-Moduln abgeleiteten Schädigung infolge Rissbildung, die während des Zug-Schwellversuchs zu einem Anstieg der tatsächlich auf den Probekörper wirkenden Beanspruchung führt, konnten die viskoplastischen Dehnungen im Zug-Schwellversuch mit dem Burgers-Modell berechnet werden. Dabei wurde eine gute Übereinstimmung der berechneten Dehnungsverläufe mit den im Versuch gemessenen Dehnungen erreicht, wie Abbildung 7-2 exemplarisch zeigt.

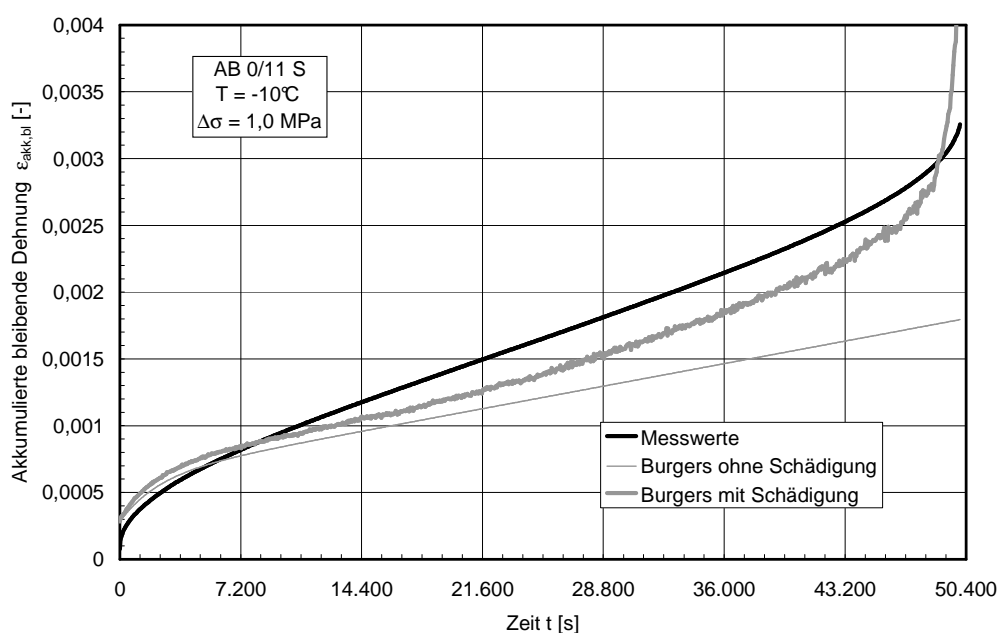


Abbildung 7-2: Vergleich des mittels Burgers-Modells berechneten Verlaufs der akkumulierten bleibenden Dehnung mit den Messwerten aus dem einaxialen Zug-Schwellversuch am Beispiel AB 0/11 S; T = -10°C; $\Delta\sigma = 1,0$ MPa

Da der im Versuch beobachtete Aufbau viskoplastischer Dehnungsanteile nur unter Berücksichtigung der Schädigung infolge Ermüdung berechnet werden konnte, ist bewiesen, dass auch diese Asphaltreaktion auf Materialermüdung zurückzuführen ist. Die akkumulierte bleibende Dehnung im Versuch verfälscht demnach nicht das

Ergebnis des Zug-Schwellversuchs, sondern ist ebenso wie die Abnahme des absoluten E-Moduls Folge der Rissbildung, die ihre Ursache in der Ermüdung des Materials hat. Der einaxiale Zug-Schwellversuch ist demnach geeignet, das Ermüdungsverhalten von Asphalt im Laboratorium anzusprechen und die daraus ermittelten Kennwerte in Prognose- und Dimensionierungsmodellen zu nutzen.

Ausblick

Die für die Dimensionierung ermittelten Ermüdungsfunktionen wurden aus Zug-Schwellversuchen gewonnen, in denen die Unterspannung in Abhängigkeit der Temperatur anhand von Versuchsergebnissen festgelegt wurde, die als „worst-case-Kriterium“ angesehen werden müssen und somit die tatsächlich in Fahrbahnbefestigungen auftretenden kryogenen Spannungen nur bedingt wiedergeben. Daher sind weitere Untersuchungen notwendig, die den Einfluss der Höhe der Unterspannung auf die Materialschädigung erklären. Wenn gleichzeitig ein Berechnungsmodell zur Verfügung steht, mit dem die kryogene Spannung infolge der in der Praxis anzutreffenden Temperaturen berechnet werden kann, lässt sich das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen in Abhängigkeit der lokalen Wetter- und Verkehrsverhältnisse noch präziser prognostizieren.

Weiterhin bleibt bei den bisher vorliegenden Dimensionierungsmodellen das Phänomen der Heilung unberücksichtigt. Durch Druckspannungen und hohe Temperaturen können sich bereits aufgetretene Risse in der Asphaltbefestigung wieder verschließen. Aus diesem Grund liegt die Nutzungsdauer von Fahrbahnbefestigungen meist um ein Vielfaches über jener, die in Berechnungsmodellen unter Verwendung von im Labor ermittelten Materialkennwerten berechnet wurde. Um dieses Phänomen berücksichtigen zu können, ist die Erweiterung der bestehenden Versuchssystematik notwendig.

Literatur

- [1] Arand, W.; Rubach, C.; v.d.Decken, S.: Grundlegende Untersuchungen über den Einfluss der Zusammensetzung auf die Ermüdungsbeständigkeit von Walzasphalten mittels systematischer Variation kompositioneller Merkmale zur Schaffung quantitativer Bewertungsmaßstäbe; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 717; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn 1996
- [2] Arand, W.: Zum Einfluss tiefer Temperaturen auf das Ermüdungsverhalten von Asphalten; Straße & Autobahn 34 (1983); S. 424 - 431
- [3] Arand, W.; Lorenzl, H.: Einfluss der Bitumenhärte auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen unterschiedlicher Dicke in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Unterlage, der Verkehrsbelastung und der Temperatur; Teil 2; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 696; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn 1995
- [4] Arand, W.; Steinhoff, G.; Eulitz, J.; Milbradt, H.: Verhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen; Entwicklung und Erprobung eines Prüfverfahrens; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 407; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn 1983
- [5] Arand, W.; Steinhoff, G.; Eulitz, J.; Milbradt, H.: Verhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen; Teil B: Einfluss kompositioneller Merkmale; Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 5.699; Braunschweig 1986
- [6] Arand, W.; Sörensen A.; Büchler S.: Ermittlung der Zugviskositäten von Asphalten mittels Retardations- und Relaxationsversuchen; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 753; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn 1997
- [7] Aschenbrenner, L.: Mehrkomponenten-Modell zur Beschreibung des Deformationsverhaltens von Asphalt; Dissertation; TU Braunschweig; 2005
- [8] Baaj, H.; Di Benedetto, H.; Chaverot, P.: Fatigue of Mixes: An Intrinsic Damage Approach; 6th Rilem Symposium PTEBM'03; pp. 394 - 400; Zürich 2003

- [9] Bodin, D.; de la Roche, C.; Piau, J.; Pijaudier-Cabot, G.: Prediction of the Intrinsic Damage During Bituminous Mixes Fatigue Tests; 6th Rilem Symposium PTEBM'03; pp. 380 - 386; Zürich 2003
- [10] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Verkehr in Zahlen 2004/2005; Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH; Hamburg; 2004
- [11] Di Benedetto, H.; de La Roche, C.; Baaj, H.; Pronk, A.; Lundström, R.: Fatigue of bituminous mixtures; Materials and Structures; Vol. 37, April 2004; pp. 202-216.
- [12] FGSV: Arbeitsanleitungen zur Prüfung von Asphalt ALP A-StB Teil 11: Herstellung von Asphaltprobeplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV); Köln; 2003
- [13] FGSV: Mechanisches Verhalten von Asphalt in Befestigungen für Verkehrsflächen - Eingangsgrößen für die Bemessung (Materialkennwerte); Arbeitspapier Nr. 65; Köln 2006
- [14] FGSV: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen RStO 01; Ausgabe 2001
- [15] FGSV: Technische Prüfvorschrift – Verhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen; Ausgabe 1994; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.; Köln, 1994
- [16] FGSV: TP A-StB - Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau - Teil: Einaxialer Druckschwellversuch - Bestimmung des Verformungsverhaltens von Asphalten bei Wärme; Ausgabe 1999
- [17] Francken, L.; Verstraeten, J.: Methods for Predicting Moduli and Fatigue Laws of Bituminous Road Mixes under Repeated Bending; Transportation Research Record 515, pp. 114-123; Washington D.C.
- [18] Gartung, T.: Berechnung von Asphaltstraßen mit einem einheitlichen rheologischen Konzept einschließlich Schädigung; Berichte aus dem Institut für Statik der TU Braunschweig; Heft Nr. 96-82; 1996

- [19] Hopman, P.; Kunst, P.; Pronk, A.: A Renewed Interpretation Model for Fatigue Measurement. Verification of Miner's Rule; 4th Eurobitume Symposium; Vol. 1; Madrid. 4-6 October; 1989; pp. 557-561.
- [20] Hürtgen, H.: Methoden zur Beschreibung der thermomechanischen Eigenschaften von Asphalt (Asphalt-Rheologie); Schriftenreihe des Fachgebietes Konstruktiver Straßenbau im Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover; Heft 20; Hannover 2000
- [21] Hütte (Hrsg.): Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften; Springer-Verlag; Berlin 1996
- [22] Khalid, H.: A comparison between bending and diametral fatigue tests for bituminous materials; Materials and Structures, Vol. 33; August-September 2000; pp. 457-465
- [23] Leutner, R.; Lorenzl, H.; Mollenhauer, K.: Ermittlung von Materialkennwerten mittels Zug-Schwellversuch und dynamischen Triaxialversuch für die analytische Bemessung; Straße & Autobahn, Heft 11/2006, S. 692-698 Kirschbaum Verlag, Bonn, 2006
- [24] Leutner, R.; Lorenzl, H.; Schmoeckel, K.; Donath, J.; Bald, S.; Grätz, B.; Riedl, S.; Möller, B.; Oeser, M.; Wellner, F.; Werkmeister, S.; Leykauf, G.; Simon, C.: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft S 45, Berg. Gladbach, 2006
- [25] Lorenzl, H.: Modell zur Ermittlung der Nutzungsdauer von Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt in Abhängigkeit der Bindemittelviskosität; Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig Heft 13; Braunschweig, 1996
- [26] Oeser, M: Numerische Simulation des nichtlinearen Verhaltens flexibler mehrschichtiger Verkehrswegebefestigungen; Veröffentlichungen des Lehrstuhls für Statik; Technischen Universität Dresden; Heft 7; Dresden 2004
- [27] Pereira, P.; Pais, J; Sousa, J.: Comparison between laboratorial and field bituminous mixtures; Mechanical Tests on Bituminous Materials; Mechanical Testing of Bituminous Materials; RILEM 1997

- [28] Read, J.: Fatigue cracking of bituminous paving mixtures; University of Nottingham, Department of Civil Engineering, Dissertation; Nottingham, 1996
- [29] Renken, P.; Büchler, S.; Mollenhauer, K.: Einfluss von modifizierten Bitumen auf die Kälte- und Ermüdungseigenschaften von Asphalt und deren Veränderung während der Nutzungsdauer Schlussbericht zum Forschungsprojekt; Schlussbericht zu FE 07.208/2004/BGB; Braunschweig 2007
- [30] Rowe, G.: Performance of Asphalt Mixtures in the trapezoidal Fatigue Test, In: Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 62, S. 344 – 384, 1993
- [31] Rubach, K.: Einfluss der Zusammensetzung von Asphaltbetonen auf deren Ermüdungsbeständigkeit unter Berücksichtigung kryogener Zugspannungen; Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig Heft 14; Braunschweig, 1996
- [32] Saal, R.; Pell, P.: Fatigue of Bituminous Road Mixes; Kolloid-Zeitschrift Band 171; 1/1960; S. 61-71
- [33] Sörensen, A.: Zugviskosität von Asphalten mittels Retardationsversuchen unter Zugrundelegung rheologischer Modelle; Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig Heft 16; Braunschweig, 2000
- [34] Van Dijk, W.: Practical fatigue characterization of bituminous mixes; Annual meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists; Phoenix, 1975
- [35] Wellner, F.; Weise, C.; Leutner, R.; Oeser, M.; Jähnig, J.; Lorenzl, H.; Schindler, K.; Mollenhauer, K.; Zander, U.; Rabe, R.: Nachhaltiger Straßenbau: Bemessungsmodell zur Förderung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Straßenbauunternehmen; Schlussbericht; Dresden; 2007
- [36] Werkmeister, S.; Wellner, F.: Die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltgemischen mit dem dynamischen Spaltzugversuch im Rahmen einer analytischen Bemessung; Bitumen, 66. Jahrgang, Heft 3, 2004
- [37] Wistuba, M.: Vermeidung von Kälterissen in Asphaltstraßen; Straße und Verkehr, Heft 10, 2006

- [38] Wistuba, M.; Lackner, R.; Blab, R.; Spiegl, M.: Low-temperature performance of asphalt mixtures used for LLP – new approach based on fundamental test methods and numerical modeling; International Journal of Pavement Engineering; Vol. 7, No. 2, 2006
- [39] Zander, U.: Grundlagen einer rechnerischen Dimensionierung des Straßenoberbaus aus Asphalt; Straße & Autobahn 9/2007; S. 488-494

Verwendete Formelzeichen

A	Fläche [mm ²]
α_T	Verschiebungsfaktor für die Zeit/Temperatur-Äquivalenz
$A, B, C; a, b, c$	Parameter einer Gleichung
a_i	Konstante zur Beschreibung der Spannungsabhängigkeit der Burgers-Elemente (i)
b_i	Koeffizient zur Beschreibung der Spannungsabhängigkeit der Burgers-Elemente (i)
C_1	Koeffizient der dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktion
C_2	Exponent der dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktion
$D^{(1)}, D^{(2)}$	Schädigungs-Parameter
ε	Dehnung [-]
$\dot{\varepsilon}$	Dehnungsrate = zeitliche Ableitung der Dehnung [1/s]
E	Elastizitätsmodul (E-Modul) [MPa]
E^*	Komplexer E-Modul [MPa]
$ E $	Absoluter E-Modul = σ_a/ε_a [MPa]
EP_{RuK}	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
ER	Energy Ratio
ΔE	Steigung der linearen Abnahme des absoluten E-Moduls
f	Frequenz [Hz]
ω	Kreisfrequenz [Hz]
F	Kraft [N]
f_z	Zugfestigkeit [MPa]
Δf_z	Zugfestigkeitsreserve [MPa]
φ	Phasenwinkel [°]
K_1	Koeffizient der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktion
K_2	Exponent der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktion
λ	Zugviskosität [MPa·s]
m	Koeffizient, verwendet bei der Zeit/Temperatur-Äquivalenz
N	Lastwechselzahl
pen	Nadelpenetration [1/10 mm]
p_i	Konstante zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit des Koeffizienten b_i der Burgers-Elemente (i)
q_i	Koeffizient zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit des Koeffizienten b_i der Burgers-Elemente (i)
ρ_a	Raumdicke [g/cm ³]
$\rho_{R,m}$	Rohdicke [g/cm ³]
R^2	Bestimmtheitsmaß
r_i	Konstante zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Konstanten a_i der Burgers-Elemente (i)
s_i	Koeffizient zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Konstanten a_i der Burgers-Elemente (i)
s	Verformung [mm]
\dot{s}	Geschwindigkeit [m/s]
S	Koeffizient zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen relativer E-Modul-Abnahme und ertragbarer Lastwechselzahl
σ	Spannung [MPa]
$\dot{\sigma}$	Spannungsänderung = zeitliche Ableitung der Spannung [MPa/s]
$\Delta\sigma$	Spannungsdifferenz [MPa]

S_1	Koeffizient der Funktion zur Beschreibung der relativen E-Modul-Abnahme
S_2	Exponent der Funktion zur Beschreibung der relativen E-Modul-Abnahme
u_i	Konstante zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit des E-Moduls des Burgers-Elementes (i)
t	Zeit [s]
T	Temperatur [°C]
\dot{T}	Temperaturrate = zeitliche Änderung der Temperatur [K/s]
T_R	Referenz-Temperatur [°C]
t_R	Relaxationszeit [s]
T_1	Koeffizient der spannungsabhängigen Zeit-Ermüdungsfunktion
T_2	Exponent der spannungsabhängigen Zeit-Ermüdungsfunktion
v_i	Koeffizient zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit des E-Moduls der Burgers-Elemente (i)
V_m	Hohlraumgehalt [Vol.-%]
W	Arbeit, Energie
Z_1	Koeffizient der dehnungsabhängigen Zeit-Ermüdungsfunktion
Z_2	Exponent der dehnungsabhängigen Zeit-Ermüdungsfunktion
Indizes	
0	den Ursprungszustand ($t = 0$) beschreibend
a	Amplitude: z.B. σ_a : Amplitude einer Spannungsschwingung
akk,bl	akkumuliert und bleibend
Br	den Bruchzustand bezeichnend
Burgers	das Burgers-Modell betreffend
el	Elastisch
F	die Kraft betreffend
IST	IST-Werte (Versuchsergebnisse)
konst	konstant
kry	kryogene Spannungen betreffend
m	mittlere: z.B. σ_m : mittlerer Wert einer Spannungsschwingung
Makro	Makroriss
Maxwell	das Maxwell-Modell betreffend
Mikro	Mikroriss
n	zum Lastwechsel n gehörend
o	Oben
PK	den Probekörper betreffend
plast	Plastisch
Prognose	prognostizierte Werte
R	Risse betreffend
S	Schädigung betreffend
s	die Verformung betreffend
Schr	Schrauben betreffend
Stahl	Stahl beschreibend
temp.unabh.	temperaturunabhängig
tr	die tertiären Dehnungsanteile betreffend
u	unten
vis	viskos
Voigt-Kelvin	das Voigt-Kelvin-Modell betreffend

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Viskoplastische und viskoelastische Dehnungsreaktion im Zug-Schwellversuch	11
Abbildung 2.1:	Exemplarischer Aufbau eine Asphaltbefestigung für hochbeanspruchte Straßen gemäß RStO [14]	15
Abbildung 2.2:	Mechanogene Spannungen in einer Asphaltbefestigung [39]	16
Abbildung 2.3:	Superposition von kryogenen und mechanogenen Spannungen [3,25]	17
Abbildung 2.4	Spannungs-Dehnungsfunktion viskoelastischer Stoffe bei sinusförmiger Beanspruchung	23
Abbildung 2.5:	Absoluter E-Modul und Phasenwinkel eines sinusförmig belasteten Maxwell-Modells in Abhängigkeit von der Frequenz f und der Relaxationszeit t_R	25
Abbildung 2.6:	Absoluter E-Modul und Phasenwinkel eines sinusförmig belasteten Voigt-Kelvin-Modells in Abhängigkeit von der Frequenz f und der Relaxationszeit t_R	27
Abbildung 2.7:	Berechnete Dehnung und Dehnungsanteile der Einzelemente des Burgers-Modells infolge einer sinusförmigen Schwellspannung	28
Abbildung 2.8:	Anwendung der Temperatur-Frequenz-Äquivalenz zur Ermittlung einer Masterkurve für die Beschreibung des frequenzabhängigen absoluten E-Moduls bei einer Referenztemperatur T_R [20]	30
Abbildung 2.9:	Berechnete Dehnung und Dehnungsanteile der Einzelemente des Burgers-Modells bei infolge einer sinusförmigen Wechsellspannung (nach Gleichung 2.13)	33
Abbildung 2.10:	Ursprüngliche A_0 und nach Rissbildung der Fläche ΣA_R geschädigte Querschnittsfläche A_S eines prismatischen Probekörpers aus Asphalt	36
Abbildung 3.1:	Korngrößenverteilungen der untersuchten Asphaltgemische	39
Abbildung 3.2	Prüfeinrichtung für Abkühl-, Zug- und Retardationsversuche	42
Abbildung 3.3:	Zugfestigkeitsreserven der untersuchten Asphalte im Vergleich ..	45
Abbildung 3.4:	In Zugversuchen ermittelte Bruchdehnungen ε_{Br} in Abhängigkeit von der Temperatur	46

Abbildung 3.5:	Prozentualer Anteil der Zugfestigkeitsreserve an der Zugfestigkeit aller untersuchten Asphalte in Abhängigkeit von der Temperatur	47
Abbildung 3.6:	Foto und Prinzipskizze der Prüfeinrichtung zur Durchführung der Zug-Schwellversuche [31].....	49
Abbildung 3.7:	Kenngrößen der sinusförmigen Zug-Schwellspannung.....	50
Abbildung 3.8:	Exemplarischer Verlauf der akkumulierten bleibenden Dehnung und des absoluten E-Moduls während eines Zug-Schwellversuches	54
Abbildung 3.9:	Ermittlung der bis zum Makroriss ertragbaren Lastwechselzahl N_{Makro} anhand der Energy Ratio ER	56
Abbildung 3.10:	Anwendung der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen zur Ermittlung der bis zur Makrorissbildung N_{Makro} ertragbaren Lastwechselzahl in Abhängigkeit von der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ [23].....	58
Abbildung 4.1:	Spannungsabhängige und dehnungsabhängige Ermüdungsfunktionen der Zug-Schwellversuche am AB 0/11 S bei -10°C	61
Abbildung 4.2:	Bruchflächen zweier Probekörper (ATS 0/22 CS) nach Zug-Schwellversuchen links: $T = -15^{\circ}\text{C}$; rechts: $T = +10^{\circ}\text{C}$	63
Abbildung 4.3:	Versuchsdauern bis zur Makrorissbildung in Zug-Schwellversuchen am AB 0/11 S bei -10°C in Abhängigkeit der Beanspruchung	64
Abbildung 4.4:	Exponenten K_2 aus verschiedenen veröffentlichten Studien.....	66
Abbildung 4.5:	Koeffizienten K_1 der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen in Abhängigkeit der Temperatur T , ermittelt bei einer Frequenz von $f = 10\text{ Hz}$	67
Abbildung 4.6:	Exponenten K_2 der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen in Abhängigkeit der Temperatur T , ermittelt bei einer Frequenz von $f = 10\text{ Hz}$	68
Abbildung 4.7:	Koeffizient K_1 und Exponent K_2 verschiedener AB 0/11 unter Variation von Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung (F: Fein, M: Mittel, G: Grob) [31].....	69
Abbildung 4.8:	Koeffizient K_1 und Exponent K_2 verschiedener AB 0/11 unter Variation des Bindemittels [31].....	70

Abbildung 4.9:	Anwendung der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen zur Berechnung der ertragbaren Lastwechselzahl für den AB 0/11 S 72	
Abbildung 4.10:	Vergleich der mittels spannungsabhängiger Ermüdungsfunktionen prognostizierten ertragbaren Lastwechselzahlen mit den tatsächlich in Zug-Schwellversuchen ermittelten Mittelwerten	73
Abbildung 4.11:	Vergleich der mittels spannungsabhängiger Zeit-Ermüdungsfunktionen prognostizierten ertragbaren Lastwechselzahlen mit den tatsächlich in Zug-Schwellversuchen ermittelten Mittelwerten	74
Abbildung 4.12:	Vergleich der mittels dehnungsabhängiger Ermüdungsfunktionen prognostizierten ertragbaren Lastwechselzahlen mit den tatsächlich in Zug-Schwellversuchen ermittelten Mittelwerten	76
Abbildung 4.13:	Temperaturunabhängige Ermüdungsfunktionen der untersuchten Asphalte aus einaxialen Zug-Schwellversuchen	77
Abbildung 4.14:	Vergleich der mittels temperaturunabhängiger, dehnungsabhängiger Ermüdungsfunktionen prognostizierten ertragbaren Lastwechselzahlen mit den tatsächlich in Zug-Schwellversuchen ermittelten Mittelwerten	78
Abbildung 4.15:	Prognosequalität von Ermüdungsfunktionen mit verschiedenen temperaturunabhängigen Exponenten K_2 (ABi 0/16 S)	79
Abbildung 4.16:	Bei der Prognosekontrolle ermittelte Exponenten und Bestimmtheitsmaße in Abhängigkeit von der Temperatur, bei der der Exponent K_2 ermittelt wurde.....	80
Abbildung 4.17:	Vergleich der mittels spannungsabhängiger Ermüdungsfunktionen mit temperaturunabhängigen Exponenten ermittelten prognostizierten ertragbaren Lastwechselzahlen mit den tatsächlich in Zug-Schwellversuchen ermittelten Mittelwerten	81
Abbildung 5.1:	In Zug-Schwellversuchen ermittelte mittlere absolute E-Moduln $ E $ in Abhängigkeit der Prüftemperatur T und der Frequenz f	83
Abbildung 5.2:	In Zug-Schwellversuchen ermittelte mittlere Phasenwinkel φ in Abhängigkeit der Prüftemperatur T und der Frequenz f	85
Abbildung 5.3:	Master-Kurven des absoluten E-Moduls $ E $ und des Phasenwinkels φ in Abhängigkeit von der korrigierten Frequenz für eine Referenztemperatur $T_R = -5^\circ\text{C}$	86

Abbildung 5.4	Ermittlung der Steigung der linearen E-Modul-Abnahme ΔE am Beispiel eines Zug-Schwellversuchs (AB 0/11 S, $T = -5^\circ\text{C}$; $f = 5\text{ Hz}$; $\Delta\sigma = 1,55\text{ MPa}$).....	87
Abbildung 5.5	Zusammenhang zwischen der im Zug-Schwellversuch ertragbaren Lastwechselzahl N_{Makro} mit der relativen Abnahme des absoluten E-Moduls $\Delta E/E_0$	88
Abbildung 5.6:	Koeffizient S zur Verknüpfung der relativen Abnahme des absoluten E-Moduls mit der ertragbaren Lastwechselzahl in Abhängigkeit von der Temperatur ($f = 10\text{ Hz}$)	90
Abbildung 5.7:	Relative Abnahme des absoluten E-Moduls in Abhängigkeit von der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ in Zug-Schwellversuchen am ABi 0/16 S (I) bei einer Frequenz $f = 10\text{ Hz}$	91
Abbildung 5.8:	Koeffizienten S_1 und Exponenten S_2 zur Beschreibung der Spannungsabhängigkeit der relativen Abnahme des absoluten E-Moduls in Abhängigkeit von der Temperatur T	93
Abbildung 5.9:	Gemittelter Verlauf des absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am AB 0/11 S bei $T = +5^\circ\text{C}$ und $\Delta\sigma = 1,3\text{ MPa}$ bei verschiedenen Frequenzen über der Lastwechselzahl sowie über der Zeit.....	94
Abbildung 6.1:	Gemittelte Verläufe der akkumulierten bleibenden Dehnungen über der Lastwechselzahl N sowie der Zeit t bei Variation der Frequenz und Spannungsdifferenz am Beispiel des AB 0/11 S bei -5°C	95
Abbildung 6.2:	Retardationsversuch: Dehnungsverläufe der Prüfungen bei $+5^\circ\text{C}$ am AB 0/11 S an jeweils drei Probekörpern mit gemittelten Kurven..	96
Abbildung 6.3:	Retardationsversuche: Dehnungsverläufe und deren Beschreibung mittels Burgers-Modells (AB 0/11 S, $T = -10^\circ\text{C}$, $\sigma = 1,694\text{ MPa}$) .	97
Abbildung 6.4:	Bestimmtheitsmaße, die bei der Anpassung des Burgersmodells an die Dehnungsmessungen im Retardationsversuch erreicht wurden	98
Abbildung 6.5:	Burgers-Modellparameter E_1 , E_2 , λ_1 , und λ_2 in Abhängigkeit von der Zugspannung σ und der Prüftemperatur T	99
Abbildung 6.6:	Konstanten a_{E1} zur Beschreibung der Spannungsabhängigkeit des Burgers-Elementes E_1 in Abhängigkeit von der Temperatur T ...	101

Abbildung 6.7:	Koeffizienten s_i der Regressionsgeraden zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Faktoren a_i aller vier Burgers-Parameter	102
Abbildung 6.8:	Regressionsfaktor r_i zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Burgers-Elemente; entspricht dem Faktor a_i bei einer Temperatur von $T = 0^\circ\text{C}$	103
Abbildung 6.9:	Temperaturabhängigkeit der Regressionsfaktoren b_{λ_1} , die den Einfluss der Spannung auf die Burgers-Elemente λ_1 der unterschiedlichen Asphalte beschreiben.....	104
Abbildung 6.10:	Temperaturabhängigkeit der Regressionsfaktoren b_{E_1} und b_{E_2} zur Beschreibung der Spannungsabhängigkeit der Elastizitätsmoduln E_1 und E_2	105
Abbildung 6.11:	Logarithmen der spannungsunabhängigen Mittelwerte der Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 in Abhängigkeit von der Temperatur T	107
Abbildung 6.12:	Mittlere Spannung σ_m zweier Zug-Schwellversuche mit unterschiedlichen Frequenzen	109
Abbildung 6.13:	Akkumulierte bleibende Dehnung in Zug-Schwellversuchen und für konstante mittlere Spannungen mittels Burgers-Modell berechnete Dehnungsverläufe (AB 0/11 S, -10°C)	110
Abbildung 6.14:	Berechnung des Verlaufs der bleibenden Dehnung in axialen Zug-Schwellversuchen unter Anwendung des Burgers-Modells mit einer aus dem Verlauf des absoluten E-Moduls berechneten Spannungszunahme infolge Schädigung (AB 0/11 S; -10°C)	113
Abbildung 6.15:	Berechnung des Verlaufs der bleibenden Dehnung in axialen Zug-Schwellversuchen unter Anwendung des Burgers-Modells mit einer aus dem Verlauf des absoluten E-Moduls berechneten Spannungszunahme infolge Schädigung (AB 0/11 S; $+5^\circ\text{C}$)	114
Abbildung 6.16	Übereinstimmung der am AB 0/11 S bei -15°C (oben) und -5°C (unten) gemessenen Dehnungsverläufe mit mittels Burgers-Modells unter Berücksichtigung der Schädigung berechneten Dehnungen; Berechnung der rheologischen Kennwerte in Abhängigkeit von der Temperatur (Gl. 6.7)	115

Abbildung 6.17	Vergleich der mit dem Burgers-Modells unter Berücksichtigung der Schädigung mit der mittels Retardationsversuche direkt ermittelten Spannungsabhängigkeit (rot) und der nach Gleichung 6.7 berechneten Spannungsabhängigkeit (blau) mit den Messergebnissen von Zug-Schwellversuchen	116
Abbildung 7.1:	Anwendung der spannungsabhängigen Ermüdungsfunktionen zur Berechnung der ertragbaren Lastwechselzahl für den AB 0/11 S	120
Abbildung 7.2:	Vergleich des mittels Burgers-Modells berechneten Verlaufs der akkumulierten bleibenden Dehnung mit den Messwerten aus dem einaxialen Zug-Schwellversuch am Beispiel AB 0/11 S; $T = -10^{\circ}\text{C}$; $\Delta\sigma = 1,0 \text{ MPa}$	122

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Reaktionen verschiedener rheologischer Modelle bei konstanter Spannung	21
Tabelle 2.2: Von Oeser aus Zug-Schwellversuchen ermittelte Schädigungsparameter $D^{(1)}$ und $D^{(2)}$ dreier Asphalte [24].....	35
Tabelle 3.1: Zusammensetzung der untersuchten Asphaltvariationen.....	40
Tabelle 3.2: Probekörperabmessungen	42
Tabelle 3.3: Als Unterspannung in Zug-Schwellversuchen angesetzte kryogene Spannungen $\sigma_u(T)$ [MPa].....	47
Tabelle 3.4: Prüfbedingungen in den Zug-Schwellversuchen	59
Tabelle 4.1: Parameter K_1 , K_2 , C_1 , C_2 der spannungs- und dehnungsabhängigen Ermüdungsfunktionen mit Angabe der erreichten Bestimmtheitsmaße R^2	62
Tabelle 4.2: Parameter T_1 , T_2 , Z_1 , Z_2 der spannungs- und dehnungsabhängigen Zeit-Ermüdungsfunktionen mit Angabe der erreichten Bestimmtheitsmaße R^2	65
Tabelle 5.1: Mittelwerte und Variationskoeffizienten der in Zug-Schwellversuchen bei $\Delta\sigma = 1$ MPa ermittelten absoluten E-Moduln und Phasenwinkel ...	84
Tabelle 5.2: Koeffizient S und erreichtes Bestimmtheitsmaß für die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen relativer Abnahme des absoluten E-Moduls und ertragbarer Lastwechselzahl bei $f = 10$ Hz.....	89
Tabelle 5.3: Koeffizienten und Bestimmtheitsmaße zur Berechnung der relativen Abnahme des absoluten E-Moduls in Abhängigkeit von der Spannungsdifferenz mit Gleichung 5.4.....	92
Tabelle 6.1: Regressionsparameter zur Berechnung der Burgers-Parameter in Abhängigkeit von der Zugspannung σ	100
Tabelle 6.2: Regressionsfaktoren zur Beschreibung der Viskositäten λ_1 und λ_2 in Abhängigkeit von der Temperatur T und der Spannung σ	105
Tabelle 6.3: Mittelwerte der ermittelten Elastizitätsmoduln E_1 und E_2	106
Tabelle 6.4: Faktoren der Geradengleichungen zur Beschreibung der Logarithmen der Elastizitätsmoduln E_1 und E_2 in Abhängigkeit von der Temperatur T	107

Anlagen

Anlagen	139
A 1 Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche	141
A 2 Ergebnisse der Zug-Schwellversuche	147
A 2.1 Ergebnisse: SMA 0/11 S (I)	147
A 2.2 Ergebnisse: SMA 0/11 S (II)	151
A 2.3 Ergebnisse: AB 0/11 S	152
A 2.4 Ergebnisse: OPA 0/8	156
A 2.5 Ergebnisse: ABi 0/16 S (I)	157
A 2.6 Ergebnisse: ATS 0/32 CS	159
A 3 Ermüdungsfunktionen	160
A 3.1 Ermüdungsfunktionen: SMA 0/11 S (I)	160
A 3.2 Ermüdungsfunktionen: SMA 0/11 S (II)	164
A 3.3 Ermüdungsfunktionen: AB 0/11 S	165
A 3.4 Ermüdungsfunktionen: OPA 0/8	168
A 3.5 Ermüdungsfunktionen: Abi 0/16 S (I)	169
A 3.6 Ermüdungsfunktionen: ATS 0/32 CS	174
A 4 Dimensionierungs-Diagramme	175
A 5 Ermittlung eines einheitlichen Exponenten für Ermüdungsfunktionen	177
A 6 Verlauf des absoluten E-Moduls	181
A 6.1 Abhängigkeit der Abnahme des absoluten E-Moduls von der Spannungsdifferenz	181
A 6.2 Zeitliche Verläufe der relativen absoluten E-Moduln	184
A 7 Akkumulierte bleibende Dehnung im Zug-Schwellversuch	191
A 7.1 Akkumulierte bleibende Dehnung: SMA 0/11 S (I)	191
A 7.2 Akkumulierte bleibende Dehnung: SMA 0/11 S (II)	193
A 7.3 Akkumulierte bleibende Dehnung: AB 0/11 S	194
A 7.4 Akkumulierte bleibende Dehnung: OPA 0/8	196
A 7.5 Akkumulierte bleibende Dehnung: Abi 0/16 S	197
A 7.6 Akkumulierte bleibende Dehnung: ATS 0/32 CS	200
A 8 Ergebnisse der Retardationsversuche	201
A 8.1 Versuchsergebnisse	201
A 8.2 Temperaturabhängigkeit der Regressionsparameter	220
A 9 Berechnung des Dehnungsverlaufs mit dem Burgers-Modell unter Berücksichtigung der Schädigung	223

A 1 Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche

Tabelle A1-1: Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche - SMA 0/11 S (I)

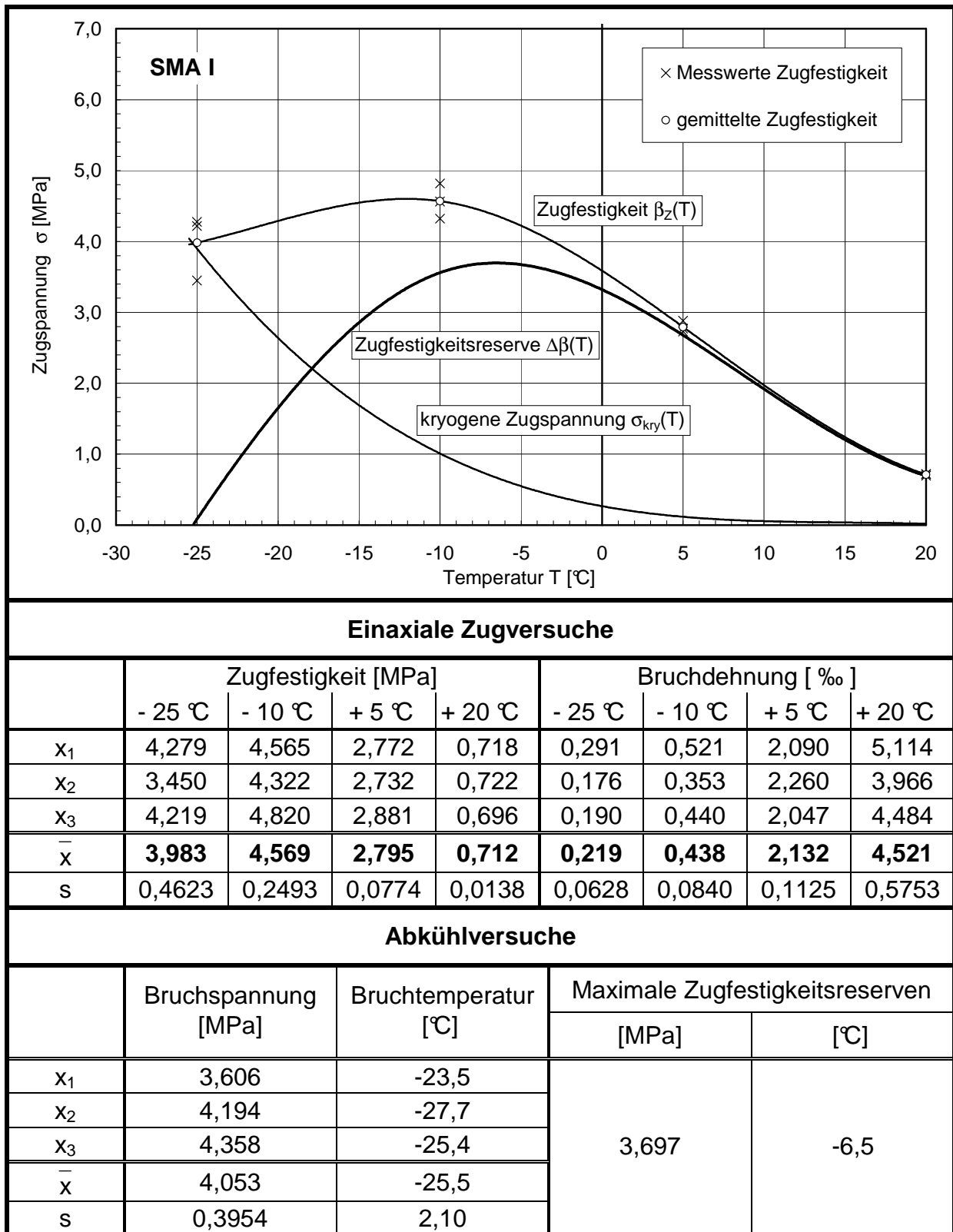
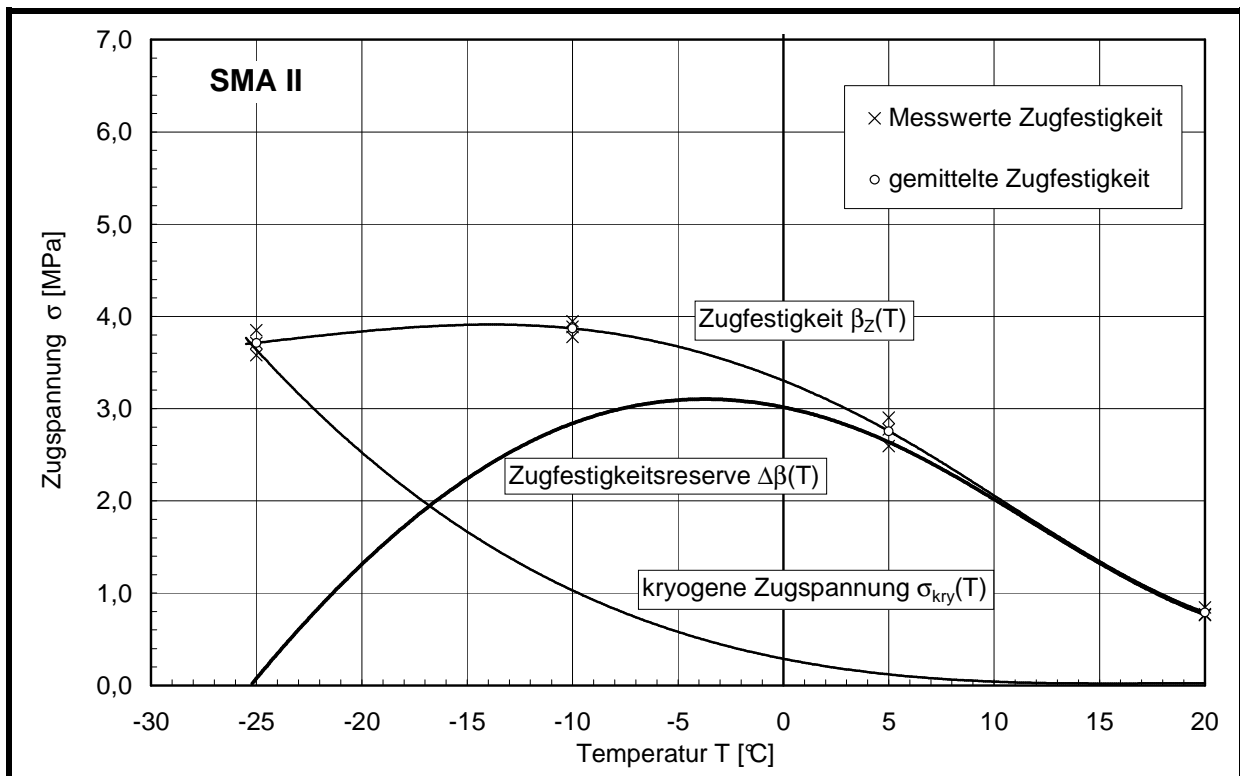


Tabelle A1-2: Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche - SMA 0/11 S (II)



Einaxiale Zugversuche

	Zugfestigkeit [MPa]				Bruchdehnung [‰]			
	- 25 °C	- 10 °C	+ 5 °C	+ 20 °C	- 25 °C	- 10 °C	+ 5 °C	+ 20 °C
x ₁	3,581	3,887	2,775	0,760	0,251	0,344	2,323	8,988
x ₂	3,850	3,777	2,594	0,846	0,182	0,336	2,315	7,196
x ₃	3,713	3,947	2,901	0,771	0,215	0,249	2,374	6,057
\bar{x}	3,715	3,870	2,757	0,792	0,216	0,310	2,337	7,414
s	0,1345	0,0862	0,1543	0,0468	0,0345	0,0527	0,0320	1,4776

Abkühlversuche

	Bruchspannung [MPa]	Bruchtemperatur [°C]	Maximale Zugfestigkeitsreserven	
			[MPa]	[°C]
x ₁	3,708	-27,4	3,103	-3,7
x ₂	3,917	-25,2		
x ₃	3,918	-24,1		
\bar{x}	3,848	-25,567		
s	0,1210	1,68		

Tabelle A1-3: Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche – AB 0/11 S

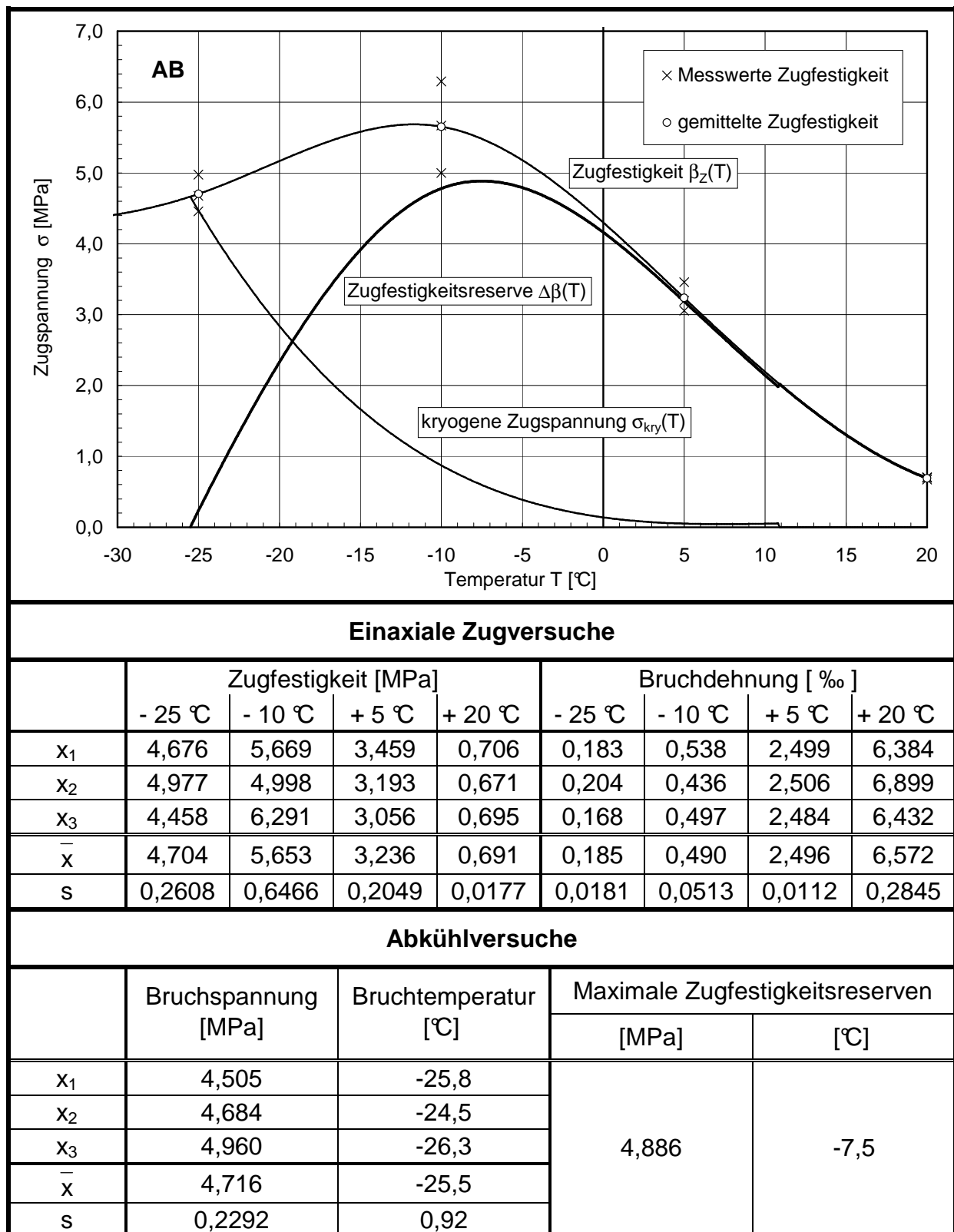


Tabelle A1-4: Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche – OPA 0/8

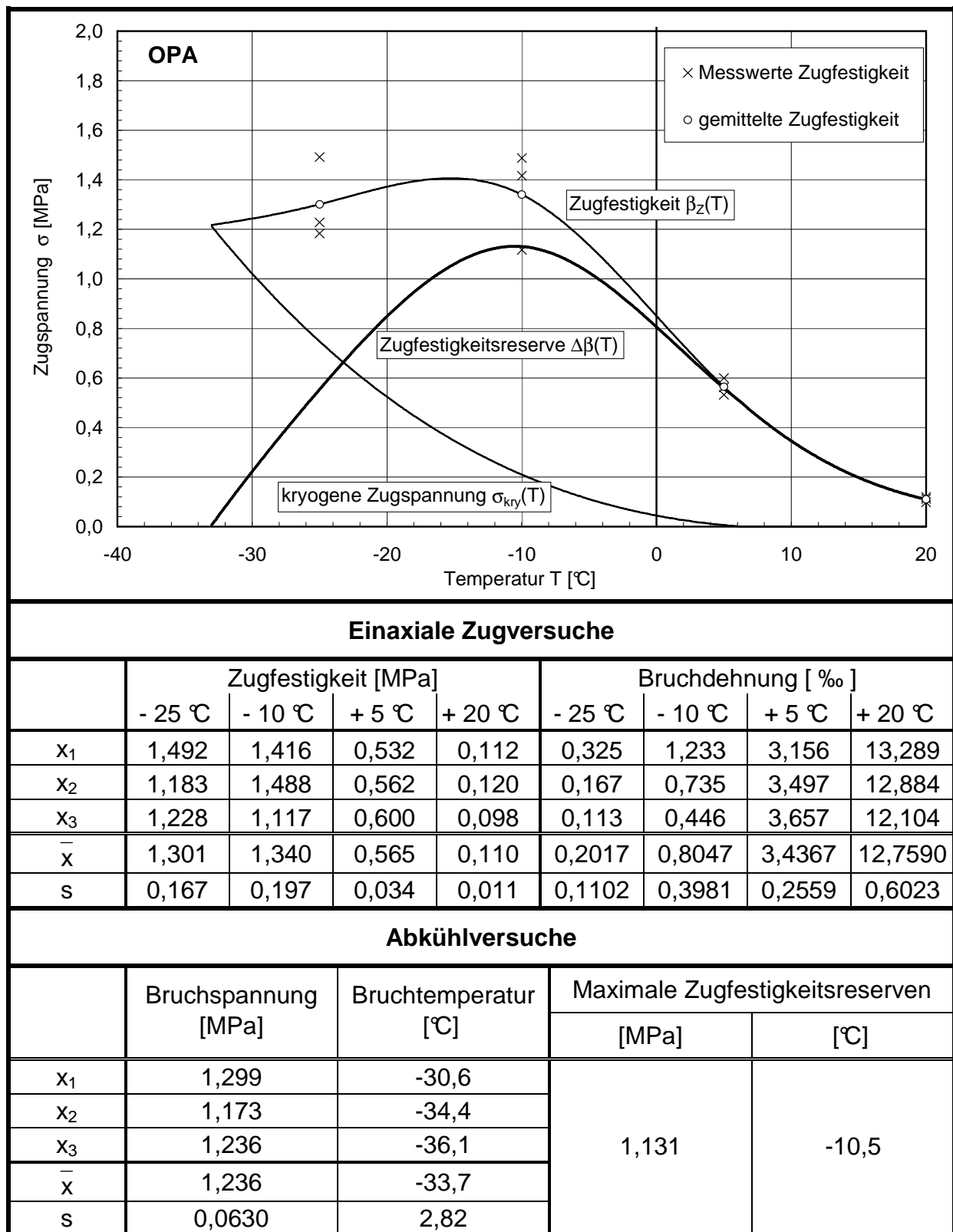
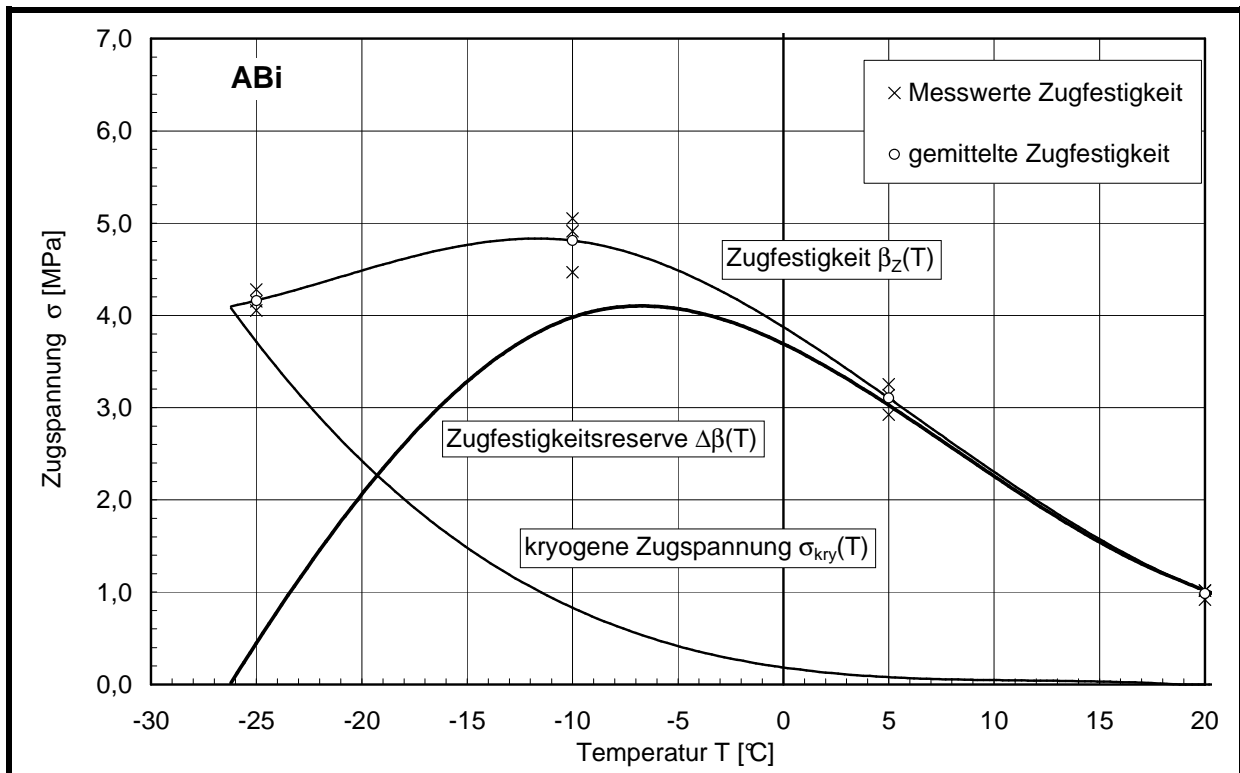


Tabelle A1-5: Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche - ABi 0/16 S



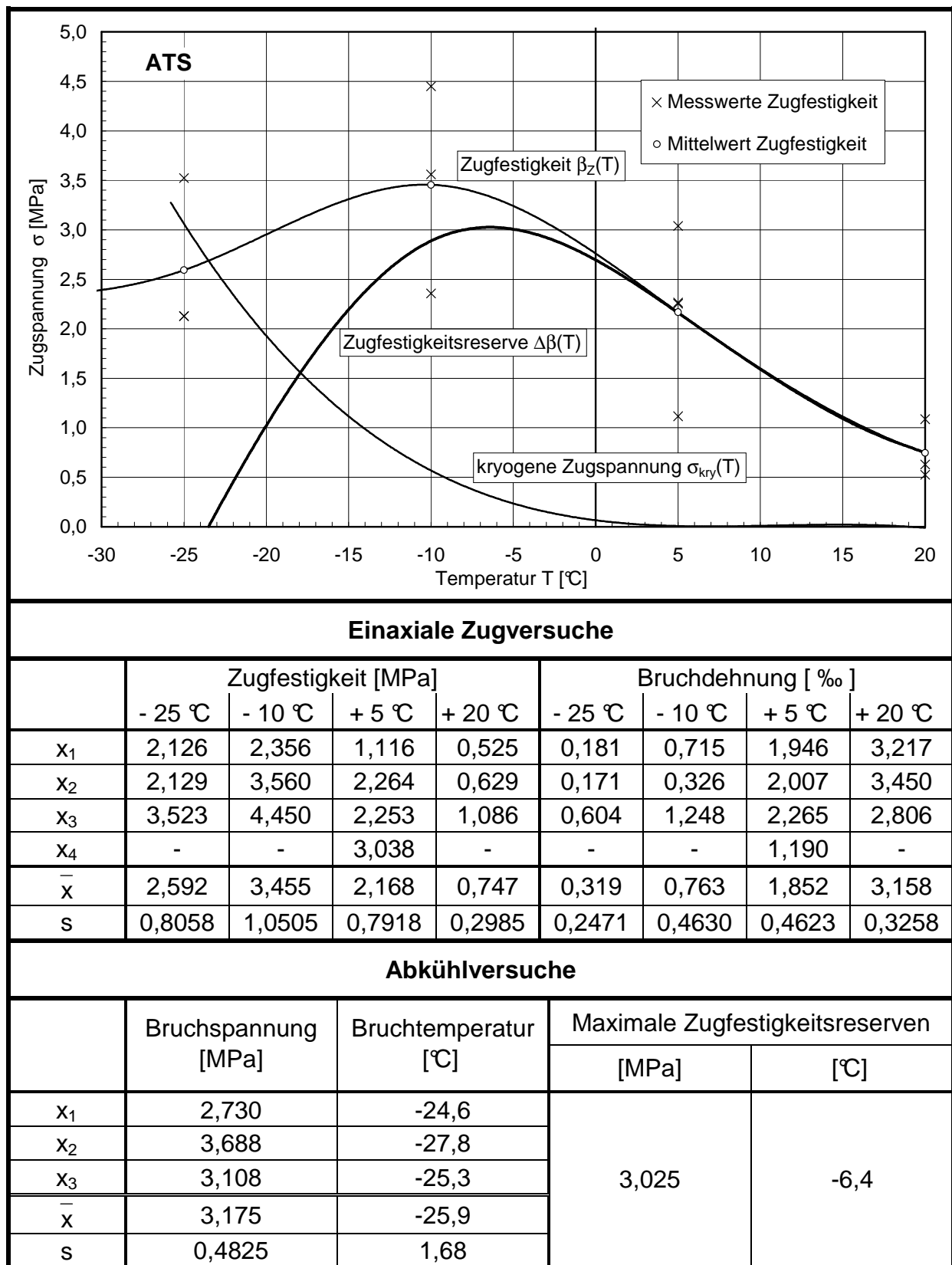
Einaxiale Zugversuche

	Zugfestigkeit [MPa]				Bruchdehnung [‰]			
	- 25 °C	- 10 °C	+ 5 °C	+ 20 °C	- 25 °C	- 10 °C	+ 5 °C	+ 20 °C
x_1	4,2799	4,9132	3,2528	0,9187	1,274	0,852	1,573	4,137
x_2	4,0532	4,4674	3,1353	1,0174	0,237	0,206	1,460	3,118
x_3	4,1525	5,0516	2,9255	1,0205	2,781	1,051	1,647	3,494
\bar{x}	4,162	4,811	3,105	0,986	1,431	0,703	1,560	3,583
s	0,1136	0,3053	0,1658	0,0577	1,2792	0,4418	0,0942	0,5153

Abkühlversuche

	Bruchspannung [MPa]	Bruchtemperatur [°C]	Maximale Zugfestigkeitsreserven	
			[MPa]	[°C]
x_1	4,181	-23,6	3,938	-5,9
x_2	3,208	-22,4		
x_3	3,972	-23,6		
\bar{x}	3,787	-23,2		
s	0,5122	0,69		

Tabelle A1-6: Ergebnisse der Zug- und Abkühlversuche – ATS 0/32 CS



A 2 Ergebnisse der Zug-Schwellversuche

A 2.1 Ergebnisse: SMA 0/11 S (I)

Tabelle A2-1: Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche – SMA 0/11 S (I), -15 °C

T [°C]	f [Hz]	$\Delta\sigma_{\text{Soll}}$ [MPa]	PK- Nummer	V_m [Vol.-%]	σ_u [MPa]	$\Delta\sigma_{\text{Ist}}$ [MPa]	N_{Makro} [-]	N_{Bruch} [-]	$\epsilon_{\text{el},100}$ [‰]	$ E _{100}$ [MPa]	ΔE
-15	3	1,000	S 101-5	3,462	1,491	1,001	33.400	35.965	0,0501	20.000	-
			S 120-1	2,711	1,487	1,005	120.000	123.684	0,0457	22.000	-
			S 120-5	2,707	1,492	1,006	126.500	132.646	0,0447	22.500	-
		1,351	S 178-4	3,485	1,494	1,351	14.611	14.611	0,0628	21.500	-
			S 117-4	2,899	1,492	1,352	15.750	16.778	0,0660	20.500	-
			S 78-2	2,906	1,493	1,356	54.400	57.922	0,0616	22.000	-
		1,802	S 117-6	3,482	1,499	1,800	6.830	6.830	0,0900	20.000	-
			S 82-3	2,661	1,498	1,804	10.400	10.560	0,0880	20.500	-
			S 121-5	2,661	1,496	1,810	9.200	9.399	0,0862	21.000	-
	5	1,000	S 181-5	2,799	1,491	1,000	250.000	258.799	0,0488	20.500	-
			S 179-6	3,267	1,491	1,000	166.000	169.967	0,0455	22.000	-
			S 179-5	2,903	1,491	1,002	98.000	98.195	0,0418	24.000	-
			S 121-4	2,952	1,490	1,005	143.000	152.728	0,0457	22.000	-
			S 123-3	2,906	1,488	1,009	230.000	234.626	0,0459	22.000	-
		1,351	S 121-1	3,087	1,486	1,351	-	56.668			-
			S 127-1	3,102	1,492	1,356	20.800	21.656	0,0616	22.000	-
			S 120-2	3,083	1,489	1,366	30.800	32.151	0,0635	21.500	-
		1,802	S 180-5	3,317	1,500	1,798	13.400	14.257	0,0782	23.000	-
			S 126-5	3,041	1,486	1,802	-	27.029			-
			S 129-2	3,006	1,494	1,808	27.400	29.158	0,0822	22.000	-
			S 123-4	3,014	1,490	1,810	12.900	13.240	0,0815	22.200	-
	10	1,000	S 32-6	3,006	1,487	1,012	430.000	447.233	0,0422	24.000	0,0051
			S120-4	2,983	1,483	1,014	295.000	309.899	0,0451	22.500	0,0044
			S 130-2	3,455	1,481	1,021	156.000	159.223	0,0486	21.000	0,0125
		1,351	S 124-6	2,673	1,489	1,361	64.000	67.041	0,0605	22.500	0,0339
			S 122-1	3,098	1,483	1,376	105.000	111.416	0,0655	21.000	0,0112
			S 119-4	3,102	1,479	1,376	97.000	99.410	0,0612	22.500	0,0076
		1,802	S 117-5	3,075	1,491	1,820	25.000	25.763	0,0858	21.200	0,0304
			S 123-1	3,064	1,485	1,827	31.700	32.914	0,0746	24.500	0,0684
			S 124-4	3,094	1,484	1,830	25.000	25.062	0,0832	22.000	0,1119

Tabelle A2-2: Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche – SMA 0/11 S (I), -5 °C

T	f	$\Delta\sigma_{\text{Soll}}$	PK-	V_m	σ_u	$\Delta\sigma_{\text{Ist}}$	N_{Makro}	N_{Bruch}	$\varepsilon_{\text{el},100}$	$ E _{100}$	ΔE
[°C]	[Hz]	[MPa]	Nummer	[Vol.-%]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[‰]	[MPa]	
-10	10	1,000	S 80-2	2,416	0,847	1,008	740.208	764.689	0,0467	21.579	-
			S 180-6	3,183	0,853	1,007	479.617	546.283	0,0496	20.292	-
			S 178-1	3,451	0,848	1,009	209.817	245.676	0,0481	20.965	-
-5	3	1,000	S 78-6	2,550	0,453	0,996	170.000	189.107	0,0547	18.200	-
			S 126-6	3,681	0,449	1,000	51.200	54.645	0,0625	16.000	-
			S 120-6	2,554	0,453	0,997	120.000	136.974	0,0586	17.000	-
		1,328	S 129-6	3,949	0,450	1,327	20.800	22.579	0,0767	17.300	-
			S 126-4	2,772	0,448	1,333	32.500	34.752	0,0803	16.600	-
			S 127-2	2,772	0,449	1,333	26.000	28.293	0,0784	17.000	-
		1,770	S 12-1	3,758	0,456	1,774	4.850	5.470	0,1183	15.000	-
			S 124-3	2,768	0,452	1,776	15.700	16.927	0,1015	17.500	-
			S 128-6	2,768	0,453	1,777	9.600	10.598	0,1015	17.500	-
	5	1,000	S 80-3	2,615	0,446	1,007	235.000	257.997	0,0550	18.300	-
			S 129-3	2,623	0,448	1,007	114.000	122.488	0,0559	18.000	-
		1,328	S 119-1	3,221	0,454	1,326	44.000	49.288	0,0758	17.500	-
			S 130-4	3,566	0,452	1,328	32.000	35.698	0,0759	17.500	-
			S 128-1	2,895	0,445	1,333	82.400	90.470	0,0762	17.500	-
		1,770	S 178-5	3,413	0,458	1,769	4.400	4.672	0,1028	17.200	-
			S 119-5	2,864	0,454	1,777	12.900	13.948	0,1084	16.400	-
	10	1,000	S 102-5	2,868	0,451	1,778	17.300	18.411	0,1010	17.600	-
			S 124-1	2,615	0,441	1,014	420.000	465.450	0,0534	19.000	0,0071
		1,328	S 81-4	3,267	0,440	1,014	348.000	373.174	0,0534	19.000	0,0061
			S 130-6	3,374	0,446	1,339	84.500	90.187	0,0812	16.500	0,0185
			S 122-6	2,979	0,447	1,341	94.000	100.812	0,0745	18.000	0,024
		1,770	S 117-2	2,979	0,445	1,344	106.000	111.613	0,0747	18.000	0,0138
			S 178-6	3,604	0,449	1,783	25.000	26.556	0,1143	15.600	0,1412
			S 104-6	2,972	0,454	1,785	44.000	47.405	0,0992	18.000	0,0736
			S 117-1	2,972	0,450	1,787	30.000	32.472	0,1021	17.500	0,0985

Tabelle A2-3: Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche – SMA 0/11 S (I), 0 °C

T	f	$\Delta\sigma_{\text{Soll}}$	PK-	V_m	σ_u	$\Delta\sigma_{\text{Ist}}$	N_{Makro}	N_{Bruch}	$\varepsilon_{\text{el},100}$	$ E _{100}$	ΔE
[°C]	[Hz]	[MPa]	Nummer	[Vol.-%]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[‰]	[MPa]	
0	3	1,000	S 81-2	2,492	0,221	0,998	96.000	104.796	0,0674	14.800	-
			S 124-2	2,492	0,221	1,000	90.000	100.952	0,0735	13.600	-
			S 33-3	3,106	0,215	1,000	50.000	53.856	0,0762	13.123	-
		1,122	S 181-2	3,278	0,215	1,122	26.776	30.006	0,0799	14.039	-
			S 80-6	2,630	0,221	1,124	39.800	42.812	0,0781	14.400	-
			S 102-2	2,630	0,218	1,129	73.600	79.552	0,0763	14.800	-
		1,495	S 181-1	3,248	0,215	1,495	7.090	7.859	0,1089	13.729	-
			S 128-3	2,688	0,224	1,499	11.200	12.514	0,1127	13.300	-
			S 121-3	2,696	0,224	1,499	4.100	4.470	0,1110	13.500	-
	5	1,000	S 128-2	2,569	0,219	1,000	148.000	160.186	0,0625	16.000	0,02
			S 80-4	2,607	0,219	1,000	162.000	181.929	0,0645	15.500	0,0302
			S 181-4	3,067	0,215	1,000	40.058	54.977	0,0683	14.647	0,0328
		1,122	S 129-1	3,681	0,215	1,122	27.487	29.221	0,0826	13.587	0,0957
			S 130-5	3,067	0,219	1,126	72.800	76.126	0,0761	14.800	0,0456
			S 127-4	3,056	0,218	1,128	50.500	53.965	0,0723	15.600	0,0506
		1,495	S 180-1	3,681	0,215	1,495	7.129	8.012	0,0998	14.979	0,3532
			S 122-2	2,814	0,222	1,496	11.400	13.323	0,1004	14.900	0,1787
			S 124-5	2,826	0,223	1,500	15.800	17.695	0,1027	14.600	0,0827
	10	1,000	S 178-3	2,887	0,215	1,000	124.731	139.443	0,0642	15.588	0,0213
			S 121-6	3,336	0,215	1,006	257.000	273.834	0,0629	16.000	0,0142
			S 132-1	3,336	0,214	1,012	234.000	255.156	0,0649	15.600	0,0135
		1,122	S 181-6	2,837	0,215	1,122	86.179	91.302	0,0723	15.513	0,0278
			S 122-3	3,236	0,215	1,133	145.000	160.615	0,0745	15.200	0,0208
			S 129-5	3,225	0,213	1,134	112.000	119.782	0,0709	16.000	0,0166
		1,495	S 180-4	2,868	0,215	1,495	31.591	34.985	0,0959	15.587	0,1004
			S 79-5	3,186	0,221	1,509	34.376	34.376	0,0961	15.700	-
			S 130-3	3,190	0,218	1,511	31.500	33.778	0,0981	15.400	0,1208

Tabelle A2-4: Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche – SMA 0/11 S (I), 5 °C

T	f	$\Delta\sigma_{\text{Soll}}$	PK-	V_m	σ_u	$\Delta\sigma_{\text{Ist}}$	N_{Makro}	N_{Bruch}	$\epsilon_{\text{el},100}$	$ E _{100}$	ΔE
[°C]	[Hz]	[MPa]	Nummer	[Vol.-%]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[‰]	[MPa]	
5	3	0,838	S 129-4	3,723	0,106	0,838	25.316	26.461	0,0789	10.627	-
			S 80-5	3,014	0,108	0,848	28.500	31.434	0,0785	10.800	-
			S 100-5	3,014	0,102	0,853	22.200	25.831	0,0742	11.500	-
		1,000	S 132-6	3,758	0,106	1,000	14.964	17.043	0,0942	10.618	-
			S 103-6	3,413	0,108	1,001	17.700	18.936	0,0927	10.800	-
			S 119-6	2,803	0,109	1,003	25.500	28.880	0,0896	11.200	-
		1,012	S 100-6	2,837	0,106	1,023	25.000	27.914	0,0947	10.800	-
		1,118	S 2-3	3,857	0,106	1,118	7.855	9.461	0,1179	9.483	-
			S 132-5	3,738	0,106	1,118	8.047	9.361	0,1116	10.019	-
			S 103-3	2,811	0,105	1,130	8.200	8.749	0,0991	11.400	-
	5	0,838	S 180-3	2,922	0,106	0,838	66.943	74.445	0,0720	11.642	0,0419
			S 121-2	3,209	0,108	0,843	75.000	80.640	0,0727	11.600	0,0465
			S 79-6	3,209	0,108	0,844	71.400	77.631	0,0728	11.600	0,0444
		1,000	S 128-4	2,845	0,106	1,000	47.319	51.973	0,0810	12.343	0,0601
			S 123-6	3,298	0,113	1,001	45.000	50.099	0,0834	12.000	0,076
			S 77-5	3,298	0,109	1,002	35.000	39.046	0,0879	11.400	0,086
		1,117	S 119-3	3,148	0,113	1,120	25.750	27.942	0,0933	12.000	0,113
		1,118	S 82-2	2,665	0,106	1,118	26.466	30.964	0,0978	11.432	0,1195
			S 117-3	3,148	0,110	1,121	20.600	23.176	0,1001	11.200	0,1273
	10	0,733	S 103-5	2,945	0,104	0,741	160.000	179.951	0,0579	12.800	0,0168
			S 100-3	2,995	0,103	0,740	242.000	274.650	0,0578	12.800	0,0115
		0,838	S 179-3	2,987	0,106	0,838	124.138	130.680	0,0647	12.951	0,0203
			S 130-1	4,030	0,108	0,845	75.000	81.971	0,0681	12.400	0,0405
			S 132-4	4,030	0,101	0,847	57.400	64.138	0,0730	11.600	0,0434
		1,000	S 78-5	2,454	0,105	1,006	98.000	104.919	0,0762	13.200	0,0381
			S 178-2	2,972	0,106	1,000	64.221	71.080	0,0793	12.618	0,046
			S 132-2	3,796	0,105	1,005	85.000	90.492	0,0810	12.400	0,0427
		1,012	S 105-3	2,995	0,106	1,022	64.000	72.453	0,0824	12.400	0,0378
		1,118	S 35-5	3,669	0,104	1,127	34.500	38.788	0,0939	12.000	0,1085
			S 101-2	3,669	0,106	1,129	33.300	35.879	0,0882	12.800	0,1059
			S 132-3	3,880	0,106	1,118	30.486	35.391	0,0939	11.902	0,1081
		1,894	S 128-5	2,301	0,120	1,896	8.266	8.623	-	-	-
		2,294	S 127-5	2,454	0,121	2,295	2.730	3.090	0,1683	13.634	1,1836
			S 179-2	2,607	0,122	2,294	2.327	2.558	0,1707	13.439	1,4728

A 2.2 Ergebnisse: SMA 0/11 S (II)

Tabelle A2-5: Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche – SMA 0/11 S (II),

T [°C]	f [Hz]	$\Delta\sigma_{\text{Soll}}$ [MPa]	PK- Nummer	V_m [Vol.-%]	σ_u [MPa]	$\Delta\sigma_{\text{Ist}}$ [MPa]	N_{Makro} [-]	N_{Bruch} [-]	$\epsilon_{\text{el},100}$ [‰]	$ E _{100}$ [MPa]	ϕ_{100} [°]	ΔE
-15	10	1,0	M29-5	2,758	1,902	1,013	59.295	59.401	0,0377	26.854	6,850	0,0147
			M 48-6	2,511	1,913	1,006	129.714	132.951	0,0401	25.068		-
			M52-3	2,182	1,911	1,009	145.593	146.255	0,0452	22.316	7,192	0,0032
-10	10	1,0	M 27-5	2,594	1,154	1,016	380.627	404.601	0,0481	21.118	6,845	0,0031
			M6-3	2,511	1,153	1,015	301.790	326.036	0,0530	19.157	6,157	0,0025
			M20-2	2,058	1,153	1,019	442.669	460.361	0,0486	20.967	6,903	0,0043
-5	10	2,0	M 208-3	3,170	0,639	2,004	10.620	11.404				-
			M 209-3	3,047	0,643	2,003	12.478	13.644	0,0937	21.372	8,344	0,191
			M 209-5	2,758	0,640	2,006	13.659	14.528	0,1217	16.480	5,013	0,0973
		1,5	M 207-4	3,129	0,632	1,507	39.453	42.772	0,0911	16.545	8,865	0,0359
			M 209-4	2,841	0,634	1,507	63.633	68.333	0,0659	22.854	10,678	0,0824
			M 209-2	2,676	0,636	1,502	47.787	50.823	0,0745	20.169	7,762	0,0361
		1,0	M7-6	3,252	0,621	1,015	70.998	76.647	0,0556	18.244	6,967	0,0205
			M29-6	2,676	0,626	1,000	288.413	306.532	0,0549	18.206	6,705	0,0125
			M28-5	2,429	0,626	1,012	287.243	312.946	0,0582	17.385	6,659	0,01004
0	10	1,0	M26-1	2,923	0,288	1,004	254.595	268.111	0,0665	15.092	9,141	0,0115
			M24-2	2,511	0,291	1,007	227.037	236.931	0,0632	15.931	9,312	0,0117
5	10	1,4	M 209-1	2,882	0,109	1,403	22.195	25.986	0,0918	15.279	17,431	0,1455
			M 207-3	2,552	0,109	1,402	34.698	38.462	0,0926	15.146	15,387	0,0934
			M 207-2	2,470	0,108	1,401	19.851	21.501	0,1112	12.600	12,857	0,1255
		1,0	M27-6	2,800	0,105	1,011	73.496	78.244	0,0881	11.470	10,739	0,0319
			M25-5	2,594	0,033	1,000	113.474	118.707	0,0742	13.473	13,301	0,0169
			M28-6	2,552	0,099	1,000	150.265	164.043	0,0779	12.832	11,769	0,0213
		0,8	M 208-4	3,335	0,100	0,805	274.815	304.863	0,0502	16.045	15,825	0,0296
			M 207-1	3,129	0,104	0,804	120.591	120.591	0,0491	16.370	14,223	0,023
		0,6	M 207-5	3,294	0,102	0,603	740.103	900.727	0,0344	17.545	23,616	0,0049
			M 209-6	2,841	0,096	0,606	759.423	883.355	0,0403	15.045	17,974	0,0058

A 2.3 Ergebnisse: AB 0/11 S

Tabelle A2-6: Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche – AB 0/11 S, -15 °C

T [°C]	f [Hz]	$\Delta\sigma_{\text{Soll}}$ [MPa]	PK- Nummer	V_m [Vol.-%]	σ_u [MPa]	$\Delta\sigma_{\text{Ist}}$ [MPa]	N_{Makro} [-]	N_{Bruch} [-]	$\varepsilon_{\text{el},100}$ [‰]	$ E _{100}$ [MPa]	Φ_{100} [°]	ΔE
-15	3	1,000	AB 31.6	2,948	2,251	0,996	28.495	28.589	0,0374	26.596	5,888	0,0165
			AB 33.6	2,666	2,250	0,999	45.164	46.593	0,0373	26.761	5,908	0,023
			AB 42-2	2,423	2,253	1,001	58.242	59.357	0,0429	23.344	5,330	-
		1,673	AB 40-1	3,312	2,257	1,673	8.309	8.309	0,0703	23.793	5,998	0,1457
			AB 38-2	2,787	2,257	1,673	16.149	16.203	0,0741	22.568	4,063	0,032
			AB 41-4	2,625	2,258	1,674	18.415	19.393	0,0683	24.503	7,530	0,1623
		2,230	AB 40-2	3,191	2,259	2,234	4.825	4.837	0,0977	22.875	5,311	0,6199
			AB 90-2	2,827	2,237	2,255	7.412	7.412	0,0902	24.992	5,632	0,19
			AB 38-3	2,585	2,258	2,234	8.753	8.790	0,0959	23.302	4,990	0,1341
	5	1,000	AB 33.1	2,948	2,250	1,002	63.110	67.845	0,0355	28.232	10,736	0,0423
			AB 90-4	2,666	2,245	1,016	91.107	98.081	0,0372	27.274	7,920	0,0436
			AB 35-5	2,666	2,246	1,000	-	133.223	-	-	-	0,0032
			AB 42-3	2,585	2,250	1,003	136.762	137.866	0,0412	24.328	6,106	0,0137
		1,673	AB 32-1	3,150	2,256	1,677	9.580	9.614	0,0602	27.862	7,545	0,0388
			AB 33-5	2,787	2,259	1,672	28.354	28.654	0,0612	27.317	8,059	0,0082
			AB 35-2	2,625	2,259	1,671	39.864	40.367	0,0677	24.690	10,414	0,0697
		2,230	AB 40-5	3,150	2,268	2,223	3.006	3.007	0,0896	24.815	8,383	0,633
			AB 38-5	2,827	2,264	2,224	4.296	4.319	0,0801	27.768	7,388	0,1623
			AB 48-5	2,666	2,246	2,230	-	5.281	-	-	-	0,212
	10	1,000	AB 85-6	3,312	2,246	1,000	87.335	90.879	0,0473	(21.146)*	3,229	0,0094
			AB 41-5	2,989	2,246	1,007	114.100	115.997	0,0347	29.024	5,060	-
			AB 49-1	2,989	2,246	1,000	98.722	101.019	0,0356	28.125	7,870	0,0037
			AB 36-6	2,706	2,246	1,010	229.963	246.553	0,0474	(21.281)*	5,813	0,0154
		1,673	AB 40-6	3,271	2,251	1,686	40.121	40.213	0,0747	(22.560)*	5,573	0,0546
			AB 32-6	2,827	2,246	1,672	49.709	50.064	0,0571	29.284	9,931	-
			AB 30-5	2,666	2,246	1,673	36.673	36.673	0,0537	31.177	14,410	0,0968
		2,230	AB 32-3	2,706	2,246	2,230	6.105	6.143	0,1043	(21.371)*	5,091	0,312
			AB 38-4	2,464	2,246	2,230	18.472	18.472	0,0810	27.532	7,544	0,0723

Tabelle A2-7: Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche – AB 0/11 S, -10 °C

T	f	$\Delta\sigma_{\text{Soll}}$	PK-	V_m	σ_u	$\Delta\sigma_{\text{Ist}}$	N_{Makro}	N_{Bruch}	$\varepsilon_{\text{el},100}$	$ E _{100}$	ϕ_{100}	ΔE
[°C]	[Hz]	[MPa]	Nummer	[Vol.-%]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[‰]	[MPa]	[°]	
-10	3	1,000	AB 101-6	3,150	1,181	0,997	209.602	217.748	0,0429	23.222	8,180	0,0192
			AB 138-2	2,827	1,177	0,995	126.241	133.400	0,0417	23.831	10,156	0,0223
			AB 138-3	2,706	1,179	0,998	79.749	83.325	0,0450	22.193	6,396	0,0159
			AB 137-5	2,504	1,174	0,997	167.741	180.057	-	-	-	-
		1,518	AB 136-3	2,827	1,180	1,517	43.821	44.676	0,0675	22.474	5,604	0,0663
		1,696	AB 101-1	3,433	1,182	1,688	49.468	49.468	-	-	-	-
			AB 137-1	2,666	1,183	1,693	24.536	25.785	0,0741	22.829	5,993	0,0873
			AB 101-5	3,029	1,171	1,696	30.793	32.125	0,0736	23.031	6,034	-
			AB 31-5	2,827	1,181	1,689	28.542	29.883	-	-	-	-
			AB 138-6	2,625	1,180	1,690	31.143	32.644	-	-	-	-
			AB99-3b	3,069	1,190	1,694	34.068	35.247	0,0788	21.491	5,512	0,0353
		2,261	AB 102-2	2,989	1,197	2,251	20.374	20.618	0,0875	25.722	7,880	0,9046
			AB 139-2	2,787	1,193	2,252	10.489	10.622	-	-	-	-
			AB 136-2	2,504	1,188	2,251	11.150	11.497	0,1008	22.335	-	-
	5	1,000	AB 101-2	3,110	1,171	1,000	302.208	321.183	0,0431	23.194	-	-
			AB 136-6	2,787	1,175	1,000	196.780	208.260	0,0416	24.055	6,193	0,0195
			AB 137-3	2,423	1,177	0,998	293.003	348.866	0,0363	(27.516)*	9,495	-
		1,696	AB 99-6	3,191	1,183	1,695	53.850	54.763	0,0830	20.416	4,127	0,0079
			AB 136-1	2,504	1,179	1,695	51.143	55.312	0,0672	25.213	5,926	0,0488
			AB 137-4	2,827	1,181	1,694	68.344	70.357	0,0686	24.708	5,655	0,0388
		2,261	AB 102-6	3,069	1,184	2,262	21.651	21.912	0,0980	23.078	5,302	0,1212
			AB 139-5	2,787	1,186	2,264	17.441	17.985	0,1251	(18.096)*	6,078	0,105
	10	1,000	AB 99-3	3,069	1,172	1,004	555.980	579.910	0,0395	25.438	4,925	0,0055
			AB 35-4	2,787	1,173	1,006	617.005	703.505	0,0403	24.947	5,222	0,00515
			AB 138-4	2,666	1,179	0,998	591.522	636.541	0,0490	(20.367)*	5,877	0,0025
		1,696	AB 99-1	3,150	1,179	1,708	95.651	100.068	0,0728	23.450	6,447	-
			AB 139-6	2,787	1,183	1,696	-	148.999	-	-	-	-
			AB 139-4	2,948	1,171	1,696	75.783	78.187	0,0655	25.895	6,506	0,016
			AB 139-3	2,666	1,185	1,698	-	116.532	-	-	-	-
		2,261	AB 139-1	3,029	1,185	2,267	42.832	44.574	0,1043	(21.732)*	5,335	0,0573
			AB 138-5	2,827	1,186	2,267	33.152	35.549	0,0877	25.854	5,803	0,07985
			AB 137-2	2,423	1,182	2,269	38.300	44.025	-	-	-	-
			AB 137-6	2,787	1,171	2,261	28.346	30.523	0,0866	26.118	6,679	0,0833
			AB 136-4	2,706	1,171	2,261	30.124	31.181	0,0954	23.690	6,043	0,0527

Tabelle A2-8: Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche – AB 0/11 S, -5 °C

T	f	$\Delta\sigma_{\text{Soll}}$	PK-	V_m	σ_u	$\Delta\sigma_{\text{Ist}}$	N_{Makro}	N_{Bruch}	$\epsilon_{\text{el},100}$	$ E _{100}$	ϕ_{100}	ΔE
[°C]	[Hz]	[MPa]	Nummer	[Vol.-%]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[‰]	[MPa]	[°]	
-5	3	1,000	AB 35-1	3,150	0,515	1,000	137.360	146.088	0,0438	22.833	12,899	0,0292
			AB 33-2	2,868	0,515	1,000	197.779	211.373	0,0521	19.179	11,255	0,026
			AB 49-2	2,423	0,515	1,000	96.366	112.297	0,0522	19.151	8,901	0,0198
		1,550	AB 48-1	3,029	0,515	1,550	13.838	14.750	0,0837	18.519	10,786	0,2324
			AB 85-5	2,868	0,515	1,550	22.966	23.750	0,0816	18.990	10,886	0,1092
			AB 31-3	2,423	0,515	1,550	43.316	50.484	0,0706	21.943	9,766	-
		2,067	AB 40-4	2,948	0,507	2,112	7.310	8.139	0,1233	17.131	7,842	0,47
			AB 36-4	2,868	0,506	2,115	7.762	8.286	0,1185	17.848	7,904	0,3419
			AB 32-5	2,504	0,517	2,098	8.177	8.203	0,1068	19.642	7,442	-
	5	1,000	AB 50-6	3,029	0,515	1,000	229.772	225.316	0,0416	24.062	13,427	-
			AB 85-4	2,868	0,511	1,020	164.823	183.971	0,0566	18.014	8,329	0,0102
			AB 41-2	2,423	0,511	1,022	226.862	251.646	0,0505	20.243	15,568	0,0113
		1,550	AB 50-3	2,908	0,509	1,579	72.098	71.463	0,0830	19.023	7,768	-
			AB 136-5	2,868	0,515	1,550	90.746	99.242	0,0699	22.186	8,230	0,0383
			AB 85-2	2,827	0,514	1,577	41.567	46.613	0,0893	17.647	7,161	-
			AB 35-6	2,585	0,514	1,577	49.625	50.017	-	-	-	-
		2,067	AB 85-3	2,908	0,512	2,100	9.846	12.640	0,1067	19.684	8,983	0,4423
			AB 27-4	2,625	0,512	2,101	15.817	15.817	0,1144	18.367	8,004	-
			AB 49-4	2,423	0,514	2,101	14.533	16.865	0,1126	18.661	8,763	-
	10	1,000	AB 41-3	3,029	0,506	1,028	471.446	481.026	0,0478	21.487	8,199	0,0154
			AB 31-4	2,746	0,531	1,035	478.164	535.661	0,0461	22.481	10,850	-
			AB 36-2	2,544	0,507	1,030	438.697	488.839	0,0534	19.270	6,679	0,0045
		1,550	AB 36-1	2,908	0,498	1,594	72.789	78.658	0,0883	18.052	7,139	-
			AB 49-3	2,827	0,503	1,591	-	146.469	0,0753	21.127	8,891	-
			AB 48-3	2,625	0,501	1,592	105.867	114.025	0,0758	20.998	8,620	0,011
		2,067	AB 50-1	2,908	0,497	2,120	34.208	36.499	0,0984	21.552	8,512	0,1363
			AB 32-2	2,746	0,502	2,111	25.745	28.225	0,0942	22.416	9,985	0,1471
			AB 48-2	2,585	0,502	2,115	29.348	31.604	0,1110	19.054	7,135	0,0269

Tabelle A2-9: Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche – AB 0/11 S, 5 °C

T	f	$\Delta\sigma_{\text{Soll}}$	PK-	V_m	σ_u	$\Delta\sigma_{\text{Ist}}$	N_{Makro}	N_{Bruch}	$\epsilon_{\text{el},100}$	$ E _{100}$	ϕ_{100}	ΔE
[°C]	[Hz]	[MPa]	Nummer	[Vol.-%]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[‰]	[MPa]	[°]	
5	3	1,000	AB 100-3	3,231	0,053	1,016	55.552	61.328	0,0733	13.855	15,305	0,0362
			AB 42-1	2,827	0,041	1,016	47.800	50.432	0,0762	13.321	13,692	0,0502
			AB 32-4	2,625	0,046	1,017	45.585	51.176	0,0792	12.834	13,194	0,0551
		1,294	AB 100-4	3,231	0,052	1,315	17.971	19.341	0,1006	13.068	12,058	0,1999
			AB 91-2	2,868	0,052	1,314	14.434	15.394	0,1043	12.602	13,845	0,2127
			AB 36-3	2,504	0,053	1,313	16.046	17.161	0,1060	12.389	13,562	0,2181
		1,544	AB 91-7	3,231	0,054	1,567	6.162	6.660	0,1305	12.006	14,448	0,5025
			AB 100-2	2,868	0,056	1,565	7.619	8.045	0,1176	13.315	13,641	0,4178
		1,744	AB 50-2	2,423	0,052	1,565	6.775	7.157	0,1281	12.224	13,536	0,4441
			AB 85-1	3,352	0,056	1,744	(1.140)*	1.270	0,1698	10.274	15,786	1,6998
	5	1,000	AB 102-5	2,666	0,054	1,015	103.882	117.143	0,0638	15.918	14,022	0,0316
			AB 100-1	3,312	0,049	1,016	65.149	71.405	0,0717	14.164	12,734	0,0417
			AB 91-3	2,908	0,063	1,017	50.367	53.456	0,0733	13.869	13,455	0,0713
		1,294	AB 49-5	2,383	0,052	1,313	14.585	16.382	0,0923	14.232	14,053	0,0927
			AB 102-4	2,908	0,055	1,314	31.476	34.688	0,0912	14.403	13,037	0,0852
			AB 102-3	3,150	0,051	1,314	30.898	33.293	0,0880	14.935	12,999	0,1138
		1,544	AB 50-5	2,464	0,056	1,563	14.681	16.147	0,1109	14.093	13,247	0,2231
			AB 91-6	2,827	0,058	1,562	9.539	9.991	0,1114	14.024	14,478	0,3787
	10	1,000	AB 91-4	3,069	0,055	1,561	10.479	11.585	0,1090	14.317	13,383	0,2804
			AB 90-6	3,150	0,051	1,016	117.230	121.106	0,0690	14.713	12,658	0,0269
			AB 90-1	3,029	0,058	1,006	175.710	195.459	0,0640	15.738	13,668	0,0169
			AB 90-3	2,908	0,055	1,008	165.621	176.383	-	-	-	0,0193
		1,294	AB 36-5	2,383	0,057	1,008	142.139	149.855	0,0653	15.443	12,179	0,0214
			AB 102-1	3,110	0,057	1,305	49.353	55.676	0,0830	15.725	12,453	0,0433
			AB 50-4	2,787	0,057	1,303	60.415	64.973	0,0914	14.256	11,537	0,0516
		1,544	AB 42-4	2,383	0,056	1,304	67.779	70.513	0,0850	15.351	13,542	0,0717
			AB 100-5	3,110	0,054	1,559	18.643	19.712	0,0976	15.979	12,861	0,1634
			AB 38-1	2,827	0,057	1,554	15.593	17.414	0,1029	15.102	13,091	0,2402
			AB 90-5	2,666	0,058	1,557	15.006	16.046	0,1080	14.421	12,468	0,1947

(* Versuchsergebnis wurde bei Bildung der Ermüdungsfunktionen nicht berücksichtigt)

A 2.4 Ergebnisse: OPA 0/8

Tabelle A2-10: Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche – OPA 0/8

T	f	$\Delta\sigma_{\text{Soil}}$	PK-	V_m	σ_u	$\Delta\sigma_{\text{Ist}}$	N_{Makro}	N_{Bruch}	$\varepsilon_{\text{el},100}$	$ E _{100}$	ϕ_{100}	ΔE
[°C]	[Hz]	[MPa]	Nummer	[Vol.-%]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[‰]	[MPa]	[°]	
-15	10	0,5	OPA 21-2	24,25	0,307	0,502	37.307	40.178	0,0579	8.672	8,450	0,0521
			OPA 36-6	24,74	0,307	0,500	91.873	108.091	0,0684	7.306	6,509	0,0164
			OPA 23-2	25,40	0,307	0,504	43.873	47.849	0,0532	9.459	9,379	0,0386
-10	10	0,4	OPA 30-5	23,96	0,173	0,401	194.352	202.361	0,0360	11.133	-	0,0152
			OPA 24-5	25,03	0,171	0,401	118.072	136.237	0,0489	8.209	-	0,0102
			OPA 26-6	25,57	0,173	0,401	161.911	191.503	-	-	-	-
		0,5	OPA 23-5	23,88	0,170	0,502	72.003	87.712	0,0598	8.395	10,561	0,519
			OPA 38-4	24,70	0,170	0,501	40.169	53.342	0,0477	10.497	14,175	0,1205
			OPA 24-4	25,40	0,173	0,501	34.103	39.324	0,0646	7.758	9,584	0,0549
		0,7	OPA 36-2	23,92	0,174	0,703	14.938	18.433	0,1043	6.742	9,718	0,1136
			OPA 39-4	25,03	0,172	0,701	13.030	16.037	0,0830	8.451	13,044	0,2075
			OPA 24-6	25,57	0,174	0,703	7.126	7.861	0,0796	8.833	12,126	0,3197
	3	0,4	OPA 38-1	24,13	0,096	0,499	20.610	25.018	0,0624	7.984	9,549	-
			OPA 28-5	25,11	0,177	0,397	(6.040)*	7.013	0,0773	5.142	12,306	-
			OPA 36-1	25,73	0,176	0,398	(10.229)*	13.942	0,0652	6.110	8,450	-
		0,5	OPA 35-2	25,73	0,173	0,497	23.507	26.133	0,0807	6.166	8,873	-
			OPA 36-4	24,33	0,176	0,697	3.236	3.610	0,1611	4.326	10,299	-
			OPA 37-5	24,33	0,179	0,698	3.491	3.915	0,1012	6.894	11,465	-
		0,7	OPA 27-2	25,03	0,178	0,698	3.853	4.315	0,1033	6.750	10,074	-
			OPA 22-5	25,07	0,177	0,498	8.591	10.029	0,0859	5.792	14,329	-
			OPA 39-5	24,29	0,096	0,499	21.358	24.044	0,0927	5.377	10,403	0,392
-5	10	0,5	OPA 27-3	24,70	0,097	0,498	37.237	45.658	0,0818	6.083	12,358	0,0588
			OPA 38-5	25,32	0,095	0,499	25.952	32.054	0,0749	6.668	14,170	0,0729
0	10	0,5	OPA 35-4	24,33	0,049	0,496	10.222	11.658	0,1022	4.854	15,854	0,1467
			OPA 21-3	24,78	0,054	0,492	11.875	13.860	0,1012	4.861	16,055	0,1039
			OPA 37-4	25,48	0,055	0,495	16.556	18.527	0,0958	5.162	14,806	0,0953
		0,4	OPA 30-6	24,33	0,053	0,395	63.581	78.983	0,0690	5.726	15,309	0,0293
			OPA 29-3	24,74	0,049	0,396	62.748	73.648	0,0723	5.478	14,396	0,0249
			OPA 29-6	25,48	0,049	0,396	21.926	30.068	0,0749	5.290	15,399	0,0571
		0,3	OPA 30-3	24,17	0,053	0,298	198.950	255.785	0,0491	6.080	14,754	0,012
			OPA 37-6	24,87	0,050	0,298	160.000	184.555	0,0570	5.224	16,387	0,0196
			OPA 23-1	25,48	0,052	0,297	104.513	117.051	0,0607	4.896	14,959	0,0127
		0,2	OPA 12-4	23,05	0,049	0,199	759.869	772.570	0,0318	6.256	14,965	0,0027
5	10	0,5	OPA 23-3	24,33	0,032	0,494	4.164	4.736	0,1311	3.766	19,087	0,2837
			OPA 21-5	24,66	0,038	0,487	3.317	4.250	0,1449	3.361	17,979	0,3225
			OPA 26-1	25,28	0,034	0,486	2.140	2.410	0,1557	3.121	18,019	0,4824
		0,4	OPA 25-2	23,84	0,033	0,393	9.422	11.601	0,1021	3.852	19,709	0,1468
			OPA 25-3	23,75	0,031	0,296	39.639	44.373	0,0734	4.036	19,994	0,0401
			OPA 30-2	24,70	0,031	0,295	29.400	39.322	0,0782	3.767	19,989	0,0453
		0,3	OPA 24-1	25,85	0,034	0,294	12.267	15.138	0,0896	3.284	21,126	0,1089
			OPA 22-2	25,85	0,029	0,197	61.267	78.781	0,0563	3.491	22,336	0,0193
			OPA 24-3	24,78	0,027	0,099	590.107	780.441	0,0237	4.170	21,110	0,0028
		0,2										
	3	0,5	OPA 29-5	24,50	0,031	0,494	863	1.089	0,2032	2.430	22,015	0,952
			OPA 28-3	25,77	0,033	0,492	505	641	0,2491	1.975	22,870	0,1678
			OPA 10-4	24,37	0,029	0,296	9.337	11.204	0,1006	2.940	19,821	0,1102
		0,3	OPA 24-2	25,15	0,032	0,297	6.646	8.073	0,1030	2.888	23,054	0,1427
			OPA 35-5	25,20	0,029	0,295	7.319	10.469	0,1056	2.795	21,313	0,1525
			OPA 37-1	25,85	0,031	0,297	4.710	5.660	0,1054	2.816	20,866	0,2231
		0,2	OPA 23-4	24,50	0,029	0,197	18.248	23.905	0,0674	2.921	23,650	0,0532
			OPA 28-6	25,20	0,029	0,197	16.310	23.370	0,0698	2.823	25,300	0,0614
			OPA 35-6	25,81	0,027	0,198	14.303	16.793	0,0757	2.612	20,743	0,053

(* Versuchsergebnis wurde bei Bildung der Ermüdungsfunktionen nicht berücksichtigt)

A 2.5 Ergebnisse: ABi 0/16 S (I)

Tabelle A2-11: Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche – ABi 0/16 S (I), -15 und -10 °C

T [°C]	f [Hz]	$\Delta\sigma_{\text{Soll}}$ [MPa]	PK- Nummer	V_m [Vol.-%]	σ_u [MPa]	$\Delta\sigma_{\text{Ist}}$ [MPa]	N_{Makro} [-]	N_{Bruch} [-]	$\varepsilon_{\text{el},100}$ [‰]	$ E _{100}$ [MPa]	ϕ_{100} [°]	ΔE
-15	3	1,000	BM 122-4	3,341	1,504	1,008	220.489	231.795	0,04756	21.200	9,914	1,36E-02
			BM 134-3	3,660	1,493	0,999	197.817	205.491	0,05317	18.789	6,593	-
			BM 137-5	4,177	1,505	1,000	117.140	128.506	0,06063	16.500	6,889	6,48E-03
			BM 140-4	3,739	1,505	0,998	127.643	130.153	0,03907	25.548	5,310	-
		1,600	BM 125-4	3,381	1,513	1,593	30.378	30.861	-	-	-	1,21E+00
			BM 135-4	3,818	1,511	1,599	32.513	33.360	0,08290	19.285	6,403	1,13E-01
			BM 138-2	3,660	1,508	1,604	62.116	64.776	0,06098	26.296	5,599	-
		2,381	BM 104-2	3,779	1,520	2,371	6.707	6.715	0,13001	18.234	6,710	1,43+00
			BM 121-4	3,421	1,522	2,367	2.384	2.385	0,12087	19.585	7,638	1,43E-01
		2,481	BM 134-2	3,620	1,520	2,370	3.970	3.985	0,12744	18.594	5,868	2,31E-01
	10	1,000	BM 103-2	5,291	1,503	1,005	97.970	103.891	0,03500	28.728	7,151	2,43E-03
			BM 120-1	4,455	1,505	1,005	195.169	196.115	-	-	-	6,62E-03
			BM 120-5	4,216	1,501	1,013	785.060	785.060	0,05351	18.934	11,221	5,88E-03
			BM 146-3	3,938	1,502	1,010	582.193	593.250	0,03850	26.242	7,170	8,00E-04
		1,600	BM 103-1	5,410	1,510	1,602	30.939	30.941	0,08773	18.263	10,804	1,98E-02
			BM 103-3	4,455	1,511	1,599	69.192	73.769	0,07465	21.420	12,053	2,00E-02
			BM 120-2	3,421	1,510	1,602	140.520	147.305	-	-	-	-
		2,002	BM 139-1	4,256	1,506	2,004	8.795	8.843	0,09049	22.149	9,059	-
			BM 140-2	3,620	1,480	1,961	40.338	41.597	0,07663	25.586	8,774	-
		2,381	BM 120-3	3,143	1,514	2,384	28.169	28.946	0,09094	26.213	6,699	1,79E-01
-10	3	1,000	BM 145-2	5,767	0,838	0,996	85.388	88.485	0,05767	17.272	6,691	0,0168
			BM 148-3	3,341	0,838	0,997	338.477	351.302	0,04667	21.357	8,899	0,006972
			BM 149-2	4,415	0,839	0,996	227.871	233.280	0,04543	21.914	7,512	0,0087
		1,600	BM 139-4	3,620	0,845	1,596	41.664	43.644	0,07654	20.847	7,264	0,0579
			Bm 142-3	4,336	0,849	1,584	9.622	10.103	0,09277	17.076	8,449	-
			BM 147-1	5,529	0,845	1,594	10.968	11.843	0,09477	16.822	6,506	0,1578
			BM 154-2	3,341	0,843	1,595	-	101.242	-	-	-	0,0348
		2,000	BM 146-2	4,256	0,852	1,986	8.212	9.505	0,10778	18.428	6,651	0,2113
			BM 149-1	5,171	0,847	1,996	6.811	6.955	0,10426	19.144	7,532	0,2433
	10	1,000	BM 139-5	4,336	0,834	1,004	672.338	727.061	0,04345	23.120	7,407	3,70E-03
			BM 140-1	4,256	0,826	0,991	524.183	548.493	0,04406	22.494	8,256	0,0075
			BM 140-3	3,580	0,834	1,004	745.454	765.613	0,03450	29.106	4,384	5,11E-03
		1,600	BM 137-5b	3,660	0,840	1,602	226.822	241.643	0,06392	25.056	8,468	0,0073
			BM 138-1	4,853	0,834	1,584	76.226	78.034	0,08598	18.426	11,274	0,0372
			BM 140-1b	3,978	0,839	1,601	46.666	48.897	-	-	-	-
			BM 143-3	3,739	0,841	1,604	104.537	106.520	0,06799	23.594	6,093	0,025
			BM 144-3	3,739	0,840	1,605	113.842	119.690	0,08903	18.033	10,678	0,0099
		2,000	BM 133-2	3,381	0,844	2,002	38.293	39.146	0,12232	16.369	10,244	0,0294
			BM 139-5b	4,415	0,844	2,003	22.382	23.133	0,11064	18.100	6,526	0,458
			BM 140-2b	3,779	0,847	2,000	36.077	38.588	0,10921	18.313	7,975	0,0487
			BM 148-2	3,620	0,848	1,995	17.717	17.749	0,08598	23.208	7,554	0,0487

Tabelle A2-12: Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche – ABi 0/16 S (I), -5, 0 und 5 °C

T [°C]	f [Hz]	$\Delta\sigma_{\text{Soll}}$ [MPa]	PK- Nummer	V_m [Vol.-%]	σ_u [MPa]	$\Delta\sigma_{\text{Ist}}$ [MPa]	N_{Makro} [-]	N_{Bruch} [-]	$\epsilon_{\text{el},100}$ [‰]	$ E _{100}$ [MPa]	φ_{100} [°]	ΔE
-5	3	1,000	BM 104-3	3,580	0,423	0,997	203.736	218.405	0,04565	21.829	8,838	6,48E-03
			BM 104-4	3,938	0,424	0,997	143.167	154.516	0,05433	18.356	6,869	1,36E-02
			BM 104-5	5,012	0,424	0,996	59.274	63.119	0,06602	15.092	9,138	4,51E-02
		1,567	BM 105-3	4,534	0,429	1,560	13.014	14.158	0,08247	18.917	7,778	2,31E-01
			BM 95-4	3,461	0,428	1,563	32.519	34.748	0,08114	19.259	7,915	1,43E-01
			BM 95-5	4,773	0,426	1,564	14.543	15.425	0,10706	14.605	7,738	1,13E-01
		2,139	BM 137-2	3,540	0,434	2,134	7.891	8.175	0,11484	18.578	8,337	-
		2,239	BM 104-1	4,694	0,434	2,234	2.197	2.338	0,13978	15.981	6,686	1,21E+00
			BM 95-1	4,614	0,446	2,203	2.189	2.448	0,11452	19.237	8,632	1,43E+00
			BM 95-2	3,580	0,433	2,234	6.760	6.962	-	-	-	-
	10	1,000	BM 5-1	5,529	0,422	1,002	231.791	240.323	0,04539	22.062	8,208	5,88E-03
			BM 61-4	4,296	0,419	1,003	397.358	424.461	0,03796	26.414	10,013	6,62E-03
			BM 6-2	3,739	0,421	1,003	949.526	1.025.678	0,04034	24.869	8,797	2,43E-03
		1,567	BM 36-4	3,818	0,427	1,570	101.716	104.936	0,06185	25.386	7,731	1,98E-02
			BM 62-4	4,376	0,425	1,572	31.523	33.216	0,06564	23.943	8,228	9,87E-02
			BM 70-5	4,256	0,424	1,578	108.591	116.002	0,06911	22.837	8,510	2,00E-02
		2,239	BM 142-3b	3,620	0,431	2,244	8.334	8.765	0,11138	20.150	6,443	4,19E-02
			BM 30-4	3,938	0,432	2,242	31.033	33.158	0,09640	23.257	6,875	8,69E-02
			BM 61-3	4,575	0,430	2,243	8.782	9.410	0,09707	23.103	8,572	1,79E-01
			BM 62-2	4,415	0,430	2,242	11.484	12.056	0,10375	21.608	8,332	2,02E-01
0	3	1,000	BM 140-3b	3,381	0,194	0,997	144.398	152.444	0,07403	13.466	8,982	0,02215
			BM 144-2	4,575	0,194	0,997	52.450	57.046	0,07283	13.686	10,078	0,0493
			BM 144-5	5,131	0,195	0,996	64.566	68.902	0,07395	13.472	9,593	0,0322
		1,440	BM 139-2b	3,461	0,198	1,436	23.379	25.896	0,09700	14.801	8,769	0,0491
			BM 142-4	5,012	0,199	1,435	3.691	4.019	0,10498	13.668	9,802	0,6693
			BM 154-1	4,534	0,199	1,434	14.854	15.957	0,09316	15.398	8,563	0,1872
		1,835	BM 141-2b	4,057	0,202	1,828	7.963	8.681	0,11695	15.633	8,249	0,3087
			BM 145-3	5,012	0,202	1,829	2.945	3.150	0,15666	11.673	7,783	0,3472
			BM 147-5	4,495	0,202	1,828	9.100	9.682	0,12151	15.046	8,646	0,3389
	10	1,000	BM 139-2	3,699	0,193	1,001	531.730	582.011	0,06238	16.054	7,808	0,0045937
			BM 139-3	3,699	0,192	1,004	265.714	304.969	0,06033	16.641	8,525	0,0051239
			BM 140-5	4,415	0,192	1,006	379.332	384.727	0,05460	18.416	10,106	0,006764
		1,440	BM 133-1	4,336	0,193	1,419	49.389	55.299	0,08813	16.102	9,652	0,030385
			BM 137-1	4,137	0,195	1,444	57.065	61.595	0,08519	16.949	8,635	0,049361
			BM 138-3	3,461	0,194	1,419	115.301	119.312	0,10029	14.153	8,896	0,013683
		1,835	BM 139-1b	4,336	0,185	1,708	11.600	13.044	0,10145	16.838	8,897	0,16332
			BM 139-3b	3,262	0,202	1,838	31.160	34.190	0,10587	17.360	8,178	0,047089
			BM 140-5b	4,177	0,200	1,838	9.293	9.832	0,12304	14.940	8,793	0,19352
5	3	0,600	BM 30-3	3,739	0,084	0,599	461.983	525.207	0,03737	16.029	14,015	7,29E-03
		0,700	BM 29-4	3,978	0,084	0,699	211.657	255.101	0,04780	14.623	11,582	5,83E-03
		0,800	BM 38-3	4,534	0,082	0,799	34.414	38.453	0,06704	11.918	9,977	3,78E-03
		1,000	BM 133-5	3,938	0,085	0,983	37.686	40.497	0,09105	10.801	12,823	4,19E-02
			BM 35-2	3,540	0,085	0,998	73.811	80.364	0,07013	14.231	10,967	5,15E-02
			BM 36-2	3,938	0,085	0,999	54.785	62.710	0,06937	14.400	9,801	7,93E-02
		1,700	BM 29-3	3,500	0,091	1,697	3.597	3.929	0,12786	13.273	10,546	1,17E+00
			BM 36-5	4,097	0,093	1,695	3.119	3.443	0,13173	12.868	11,408	1,42E+00
			BM 37-2	4,654	0,094	1,696	1.313	1.444	0,14865	11.409	11,275	2,79E+00
	10	0,600	BM 7-4	3,779	0,076	0,606	1.456.923	1.494.857	0,03496	17.323	10,701	3,11E-03
		0,700	BM 35-4	3,381	0,078	0,706	1.243.033	1.363.718	0,04202	16.808	10,442	0,0035
		0,800	BM 38-5	5,052	0,080	0,806	119.998	147.127	0,05364	15.031	12,054	1,24E-02
		1,000	BM 29-5	4,296	0,082	1,004	188.946	204.532	0,06598	15.213	9,781	6,72E-03
			BM 30-5	4,455	0,082	1,004	129.571	140.913	0,06452	15.557	10,318	1,16E-02
			BM 38-4	5,052	0,082	1,001	46.626	52.935	0,07220	13.785	10,016	1,17E-01
		1,700	BM 29-2	3,540	0,088	1,703	12.540	13.620	0,10968	15.529	10,499	1,80E-01
			BM 30-1	4,853	0,089	1,703	5.758	6.340	0,12038	14.145	10,120	6,51E-01
			BM 35-3	3,381	0,089	1,704	16.601	17.866	0,10711	15.906	10,514	1,76E-01

A 2.6 Ergebnisse: ATS 0/32 CS

Tabelle A2-13: Ergebnisse der Einaxialen Zugschwellversuche – ATS 0/32 CS

T [°C]	f [Hz]	$\Delta\sigma_{\text{Soll}}$ [MPa]	PK- Nummer	V_m [Vol.-%]	σ_u [MPa]	$\Delta\sigma_{\text{Ist}}$ [MPa]	N_{Makro} [-]	N_{Bruch} [-]	$\epsilon_{\text{el},100}$ [‰]	$ E _{100}$ [MPa]	ϕ_{100} [°]	ΔE
-15	10	1,000	T 135-2	6,169	-0,309	1,000	277058	286175	0,0411	24.317	9,532	0,0023
			T 141-1	6,758	1,141	1,000	389.212	391.881	0,0349	28.683	8,839	0,0257
		1,250	T 144-2	5,855	1,141	1,247	273.405	276.319	0,0385	32.348	13,543	0,042
			T 91-3	6,523	1,142	1,245	38.091	39.971	0,0444	28.024	8,712	0,0242
		1,500	T 148-2	6,523	1,134	1,500	70	70	0,0542	27.670	30,448	28,962
-10	10	1,000	T 68-3	6,090	0,568	1,002	899.081	900.725	0,0480	20.887	6,693	0,0004872
			T 101-3	6,562	0,573	1,002	67.922	69.908	0,0583	17.182	6,803	0,0106
			T 144-1	7,308	0,573	1,003	287771	311278	0,0182	55.203	38,095	01559
		1,500	T 138-2	5,933	0,578	1,499	88.578	90.867	0,0591	25.373	7,867	0,01294
			T 144-3	6,523	0,579	1,499	50.832	53.005	0,0446	33.566	10,969	0,0159
			T 85-1	7,308	0,579	1,498	21.646	21.934	0,0694	21.593	7,996	0,0555
		2,000	T 151-2	5,815	0,590	1,984	589	595	0,0883	22.470	8,817	0,5716
			T 134-3	6,680	0,589	1,979	44	44	0,1001	19.773	13,767	12,645
-5	10	1,000	T 141-2	6,012	0,227	1,003	447.969	496.231	0,0365	27.506	17,356	0,003858
			T 98-2	6,483	0,227	1,003	291.717	305.741	0,0134	74.635	31,576	0,0026
			T 118-1	7,151	0,227	1,003	512.027	553.226	0,0190	52.840	23,741	0,0039
		1,500	T 118-2	5,776	0,231	1,501	33013	35958	0,1070	14.020	8,055	0,06258
			T 138-3	6,680	0,230	1,501	35023	37513	0,0268	55.948	19,066	0,0135
			T 59-1	7,308	0,232	1,500	5.119	5.449	0,0798	18.809	8,669	0,1586
		2,000	T 101-2	6,090	0,239	1,990	5.293	5.410	0,0721	27.596	11,126	0,1736
			T 136-3	6,523	0,238	1,993	1.886	1.910	0,1147	17.372	9,137	0,5166
0	10	1,000	T 143-1	7,348	0,239	1,992	3.605	3.680	0,0800	24.890	13,382	0,2867
			T 139-3	6,719	0,099	1,004	73546	80098	0,0303	33.163	20,779	0,01696
			T 68-2	7,151	0,099	1,003	494.683	528.781	0,0394	25.467	16,345	0,0044
		1,500	T 81-1	7,348	0,100	1,003	106498	114408	0,0260	38.581	23,244	0,0139
			T 134-2	6,090	0,103	1,500	17.408	18.534	0,0874	17.171	10,426	0,04626
			T 85-3	6,640	0,104	1,501	12.564	13.301	0,0807	18.587	10,717	0,045
		1,750	T 134-1	7,151	0,104	1,501	14.052	14.770	0,0741	20.249	12,107	0,0836
			T 142-2	5,815	0,108	1,787	11.730	12.410	0,0836	21.377	12,610	0,0725
5	10	0,800	T 143-2	6,483	0,107	1,747	1.413	1.486	0,0712	24.551	13,936	0,9198
			T 85-2	6,090	0,062	0,803	143.068	156.104	0,0312	25.723	19,026	0,01703
			T 143-3	6,601	0,064	0,798	74.972	79.326	0,0349	22.869	15,334	0,173
		1,000	T 121-2	6,680	0,062	0,803	29.102	33.950	0,0474	16.927	14,118	0,0479
			T 84-2	6,169	0,064	1,002	83.626	87.400	0,0450	22.280	14,283	0,01673
			T 67-3	6,798	0,064	1,002	37.411	40.198	0,0523	19.161	15,071	0,0334
		1,500	T 138-1	7,505	0,065	1,000	2.381	2.596	0,0760	13.155	14,967	0,7447
			T 145-2	6,090	0,069	1,500	7.202	7.987	0,0584	25.679	19,156	0,2414
			T 142-1	7,348	0,067	1,500	484	517	0,0966	15.523	16,781	2,1407

Kursiv gedruckte Ergebnisse wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt

A 3 Ermüdungsfunktionen

A 3.1 Ermüdungsfunktionen: SMA 0/11 S (I)

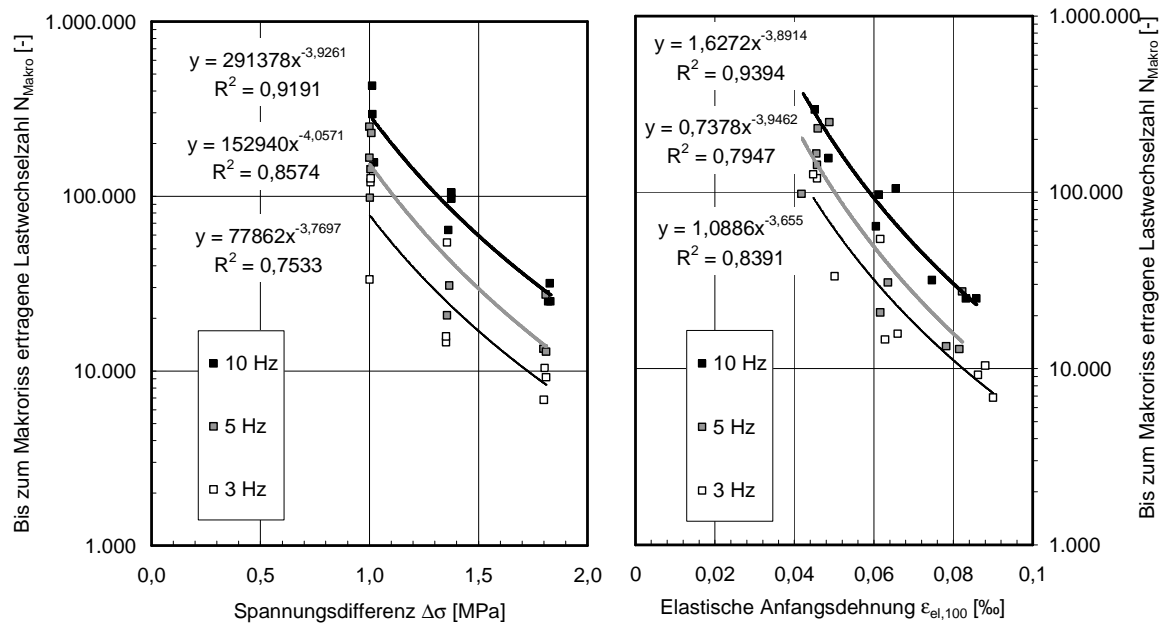


Abbildung A3-1: Ermüdungsfunktionen – SMA 0/11 S (I), -15 °C

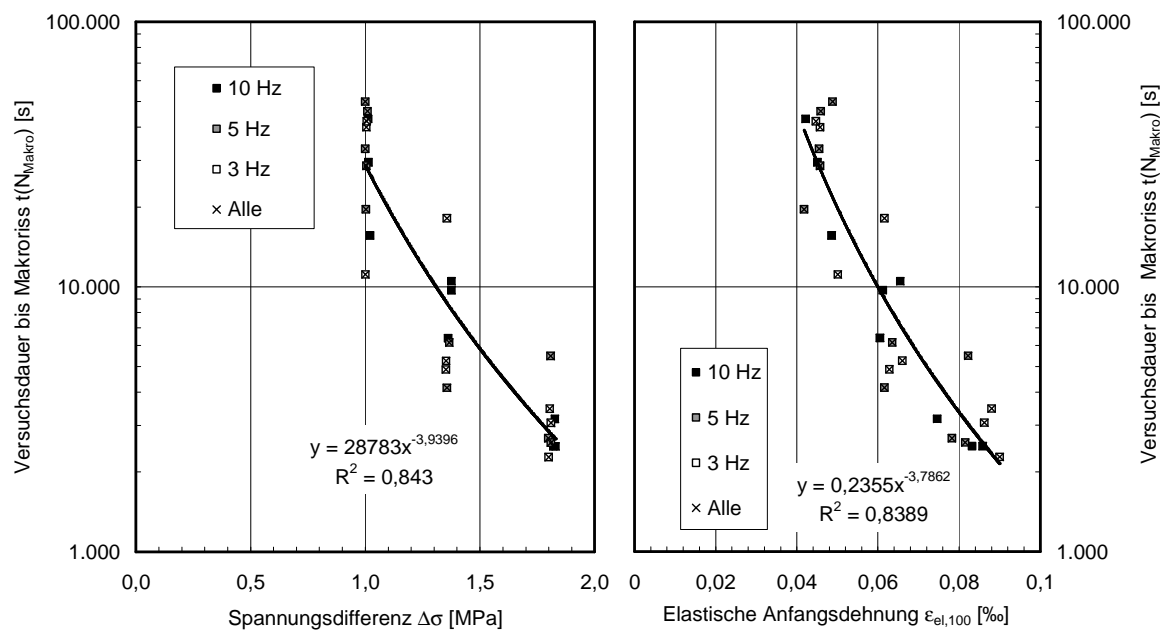


Abbildung A3-1: Zeit-Ermüdungsfunktionen – SMA 0/11 S (I), -15 °C

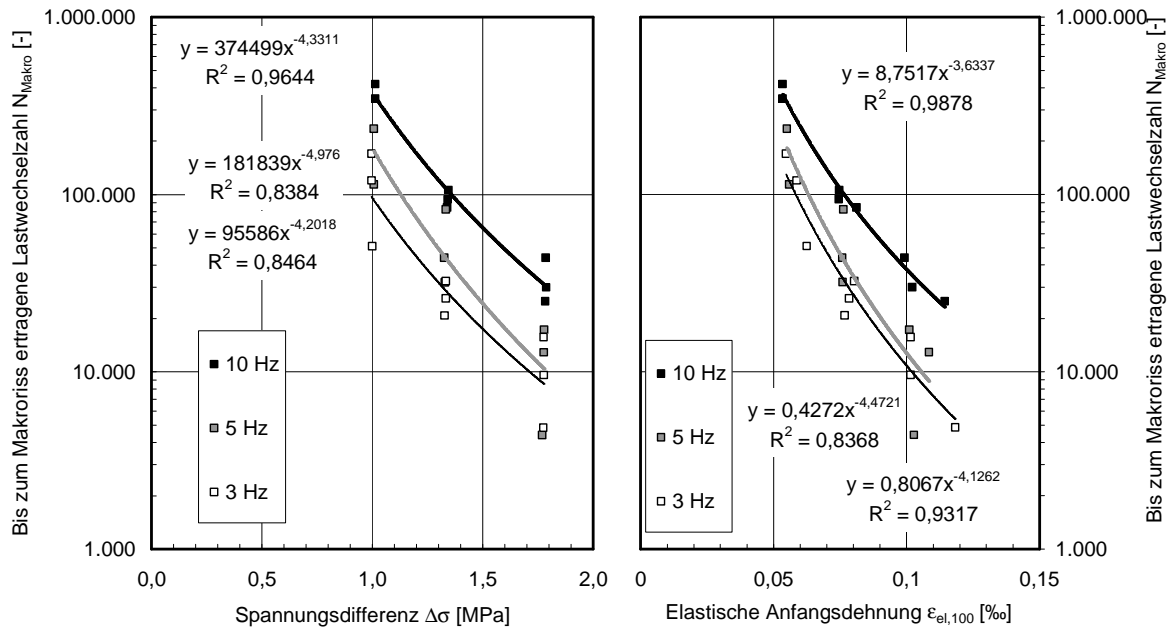


Abbildung A3-3: Ermüdungsfunktionen – SMA 0/11 S (I), -5 °C

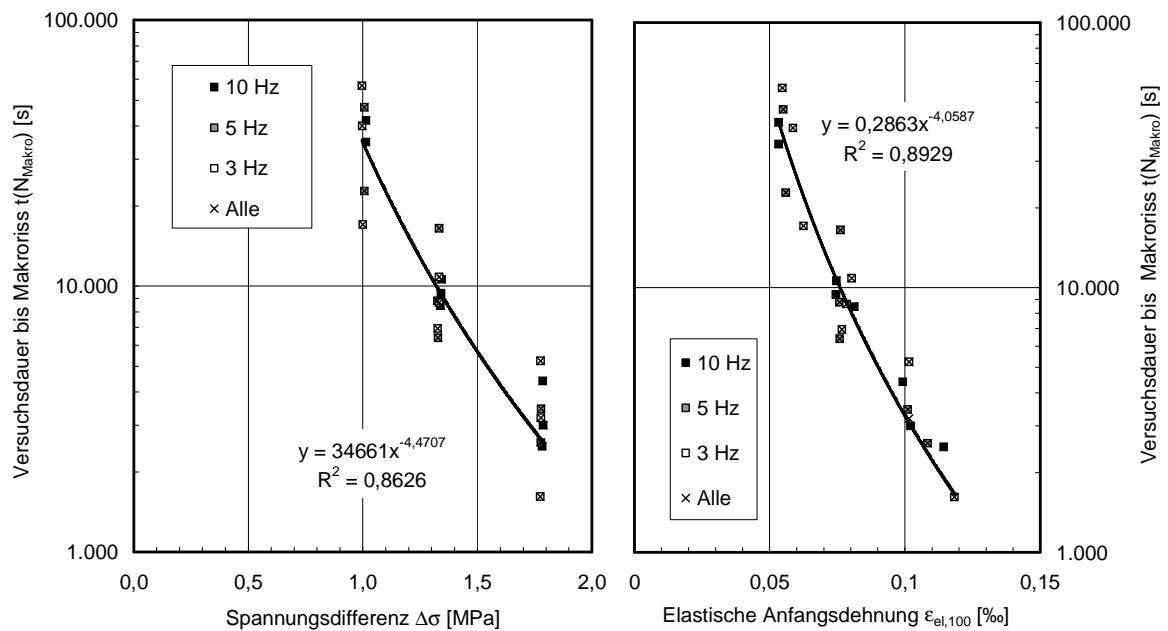


Abbildung A3-4: Zeit-Ermüdungsfunktionen – SMA 0/11 S (I), -5 °C

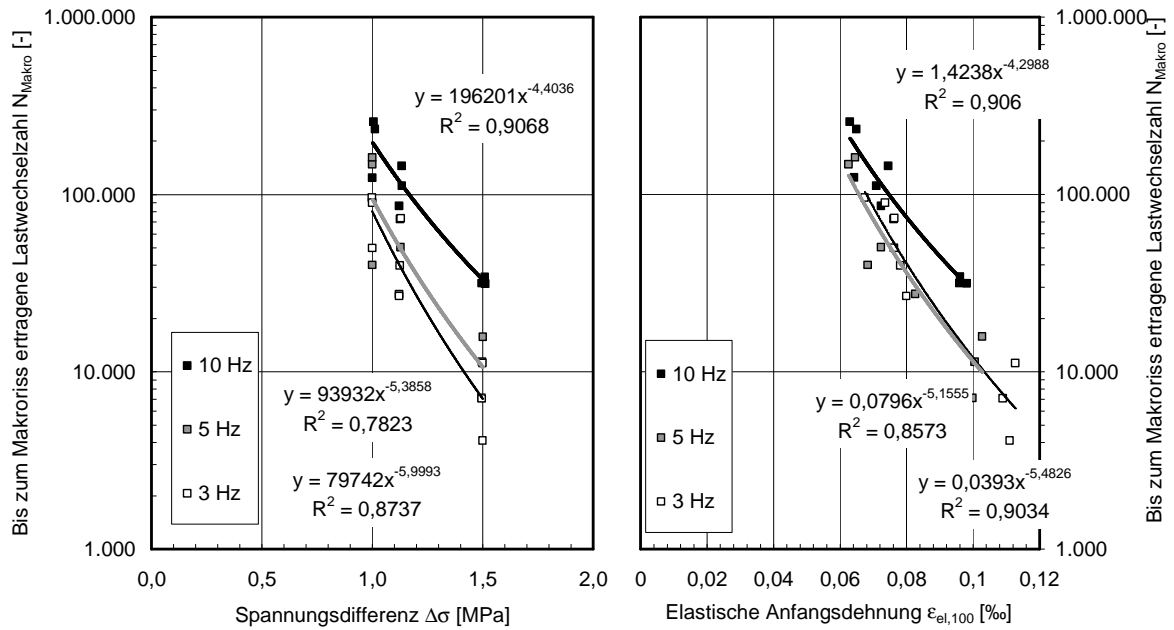


Abbildung A3-5: Ermüdungsfunktionen – SMA 0/11 S (I), 0 °C

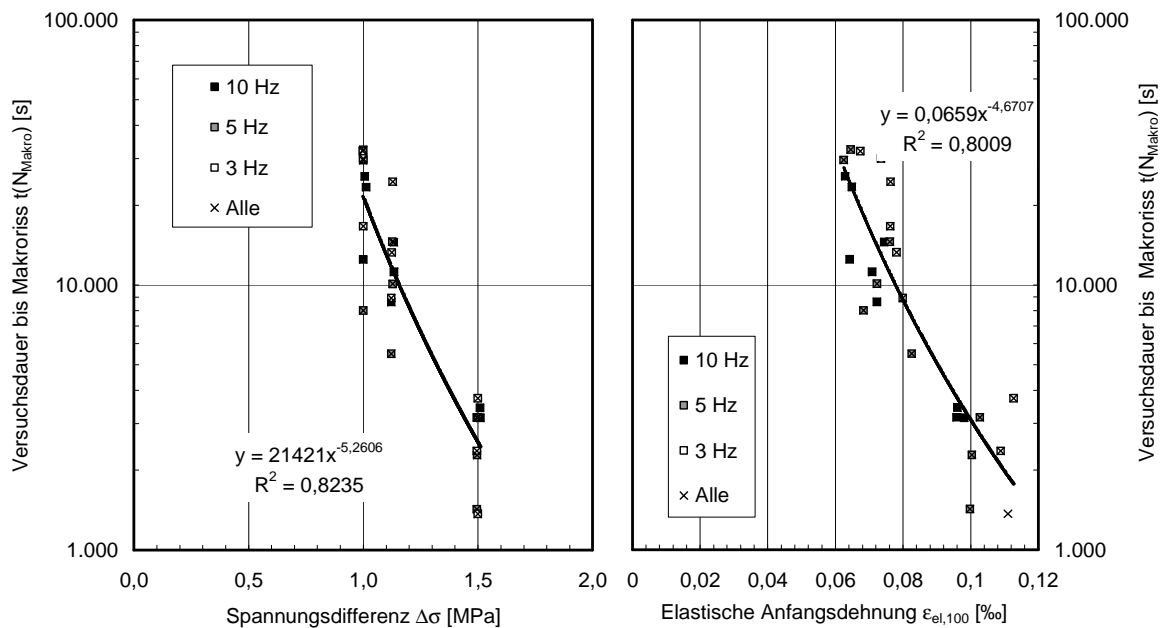


Abbildung A3 -6: Zeit-Ermüdungsfunktionen – SMA 0/11 S (I), 0°C

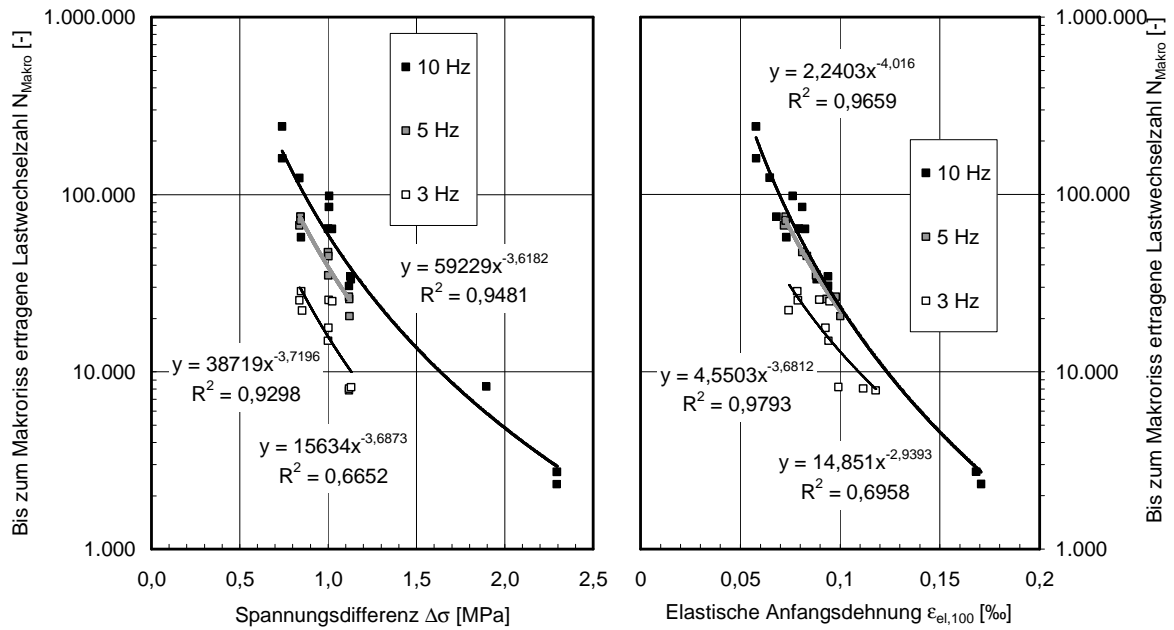


Abbildung A3-7: Ermüdungsfunktionen – SMA 0/11 S (I), +5 °C

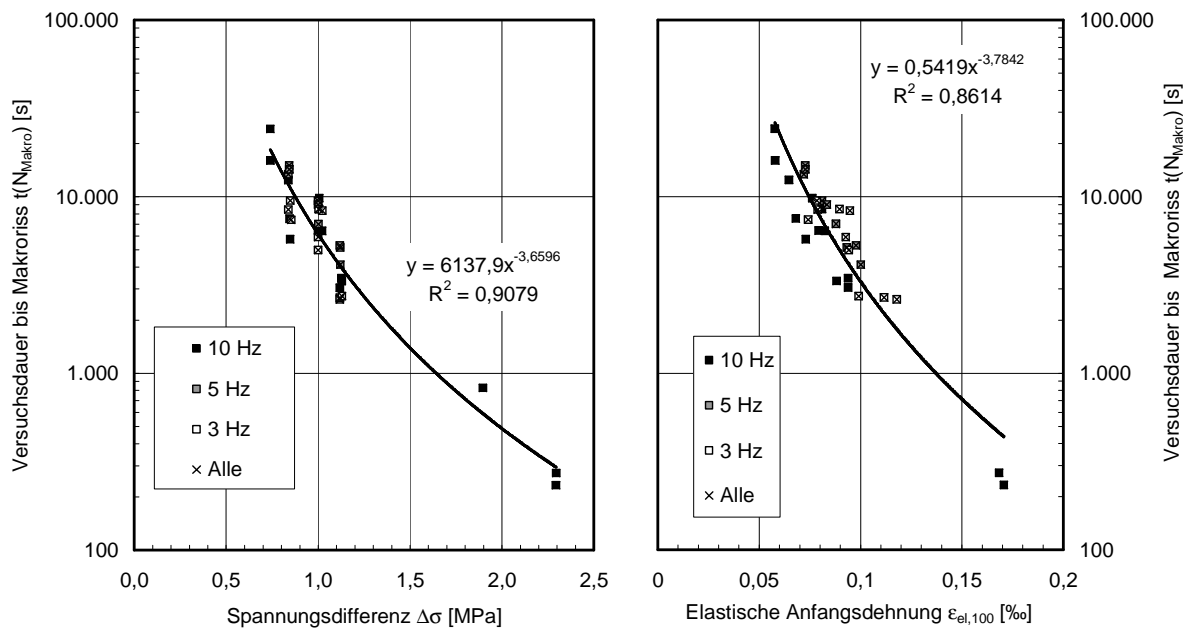


Abbildung A3-8: Zeit-Ermüdungsfunktionen – SMA 0/11 S (I), +5 °C

A 3.2 Ermüdungsfunktionen: SMA 0/11 S (II)

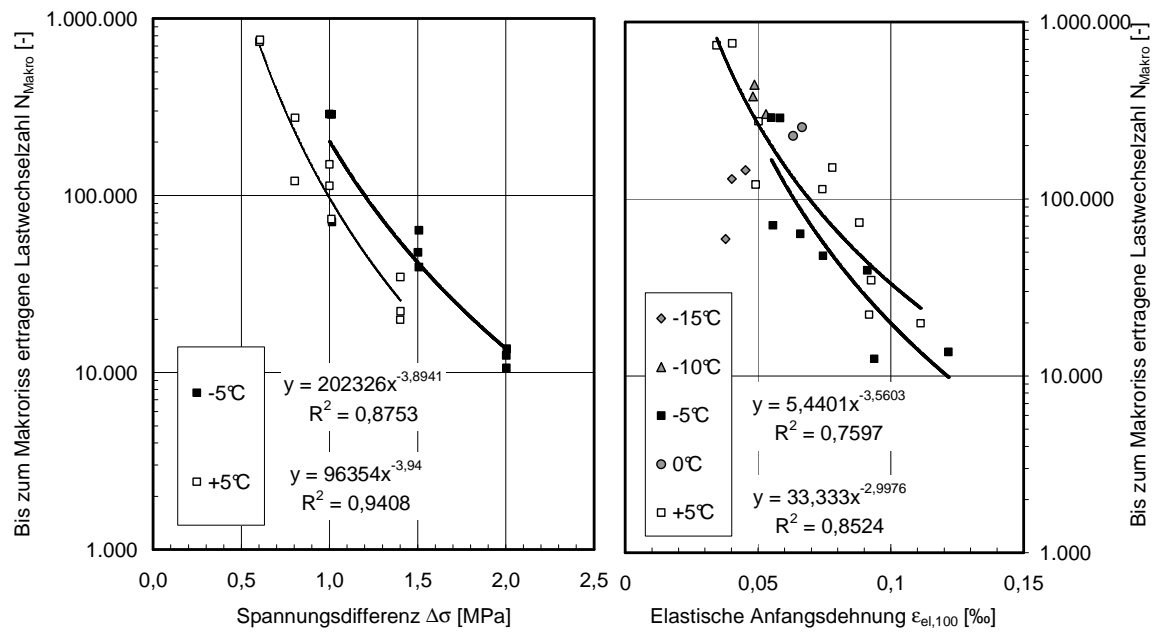


Abbildung A3-9: Ermüdungsfunktionen – SMA 0/11 S (II) (f = 10 Hz)

A 3.3 Ermüdungsfunktionen: AB 0/11 S

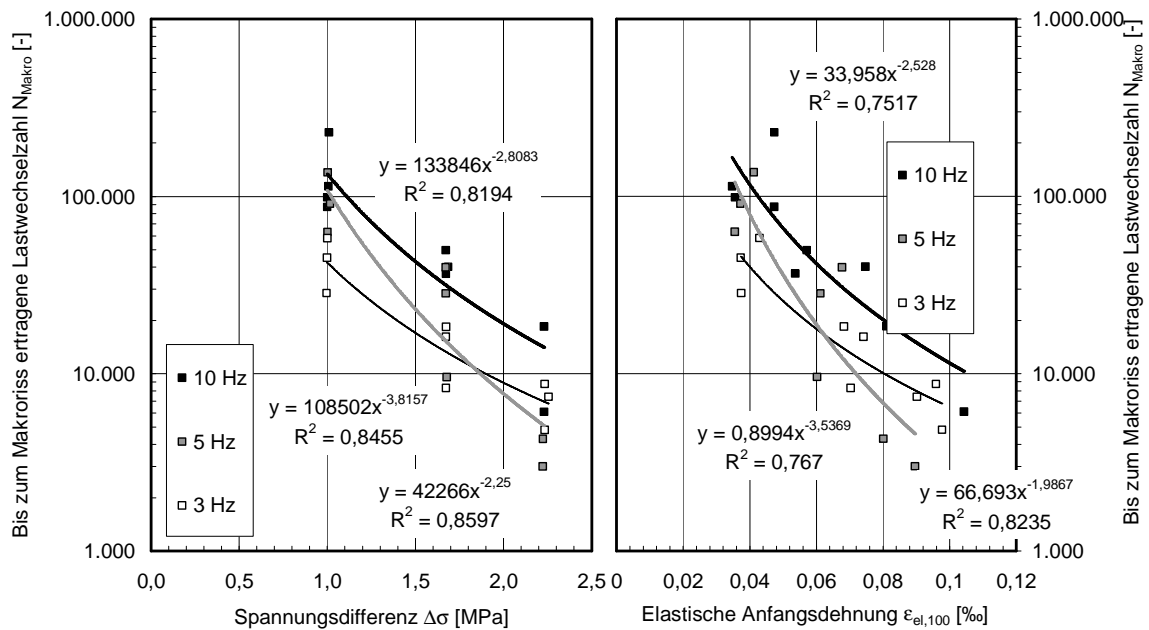


Abbildung A3-10: Ermüdungsfunktionen – AB 0/11 S, -15 °C

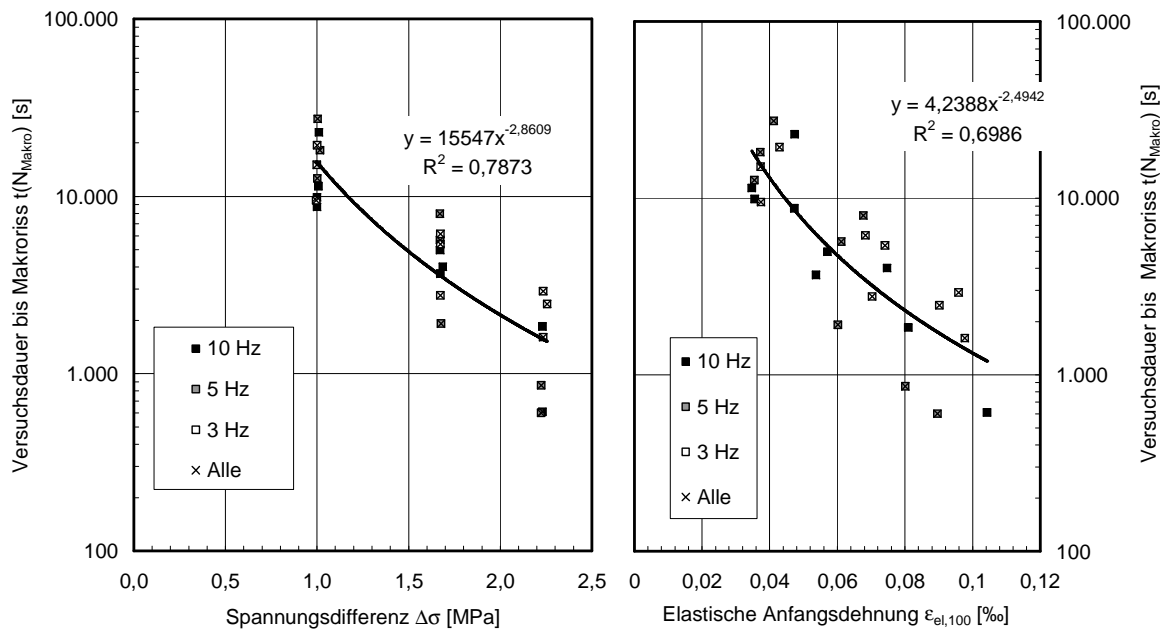


Abbildung A3-11: Zeit-Ermüdungsfunktionen – AB 0/11 S, -15 °C

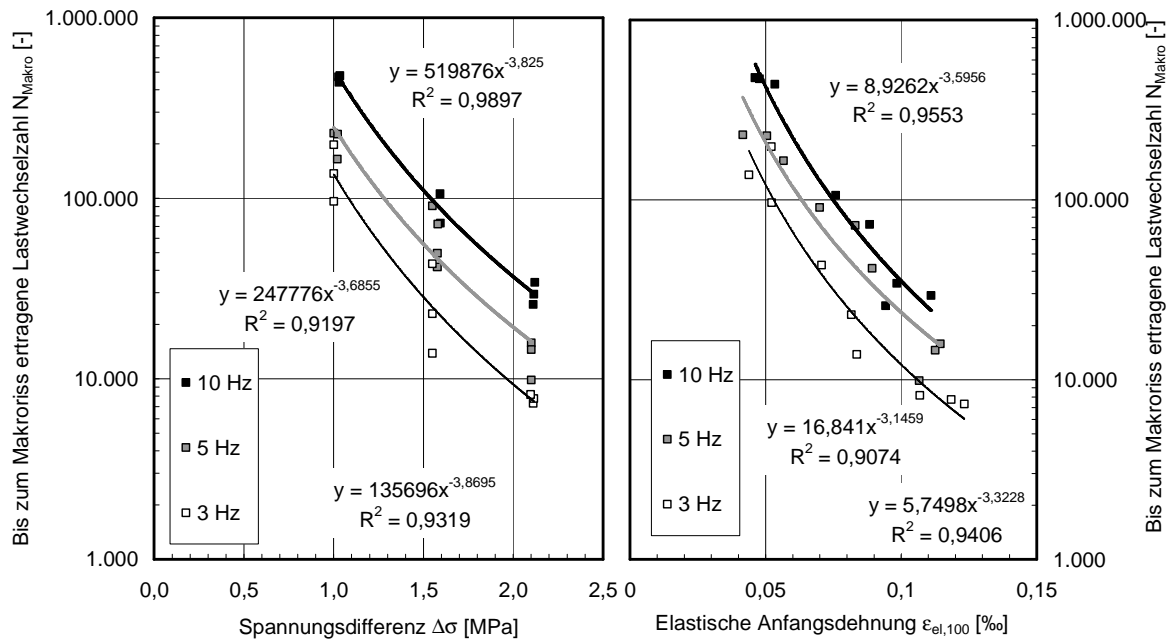


Abbildung A3-12: Ermüdungsfunktionen – AB 0/11 S, -5 °C

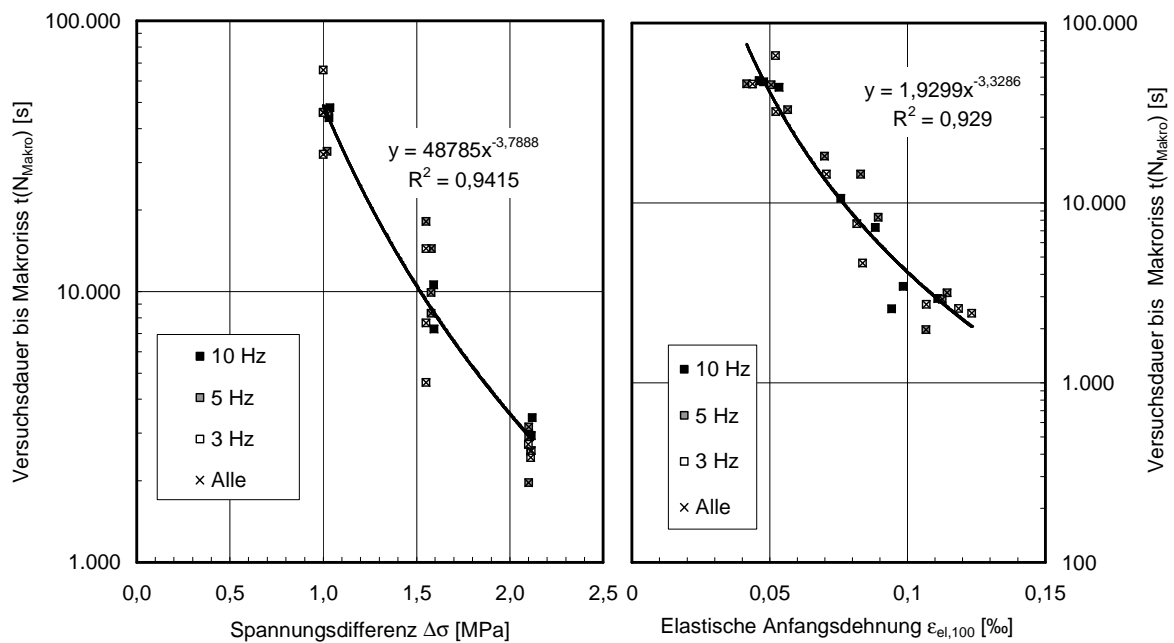


Abbildung A3-13: Zeit-Ermüdungsfunktionen – AB 0/11 S, -5 °C

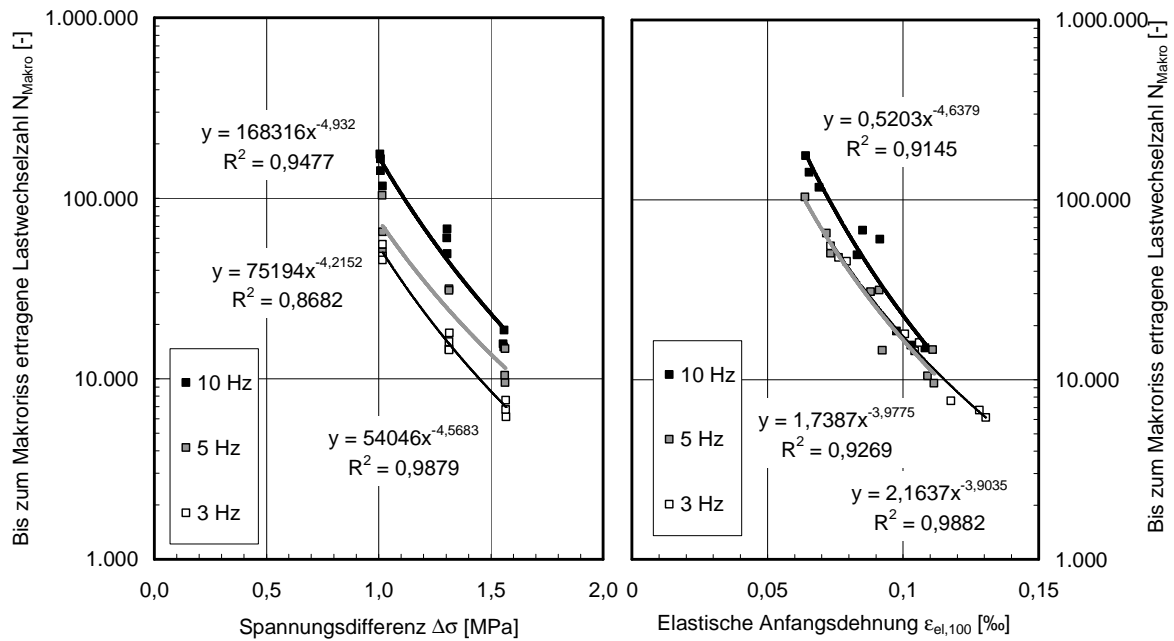


Abbildung A3-14: Ermüdungsfunktionen – AB 0/11 S, +5 °C

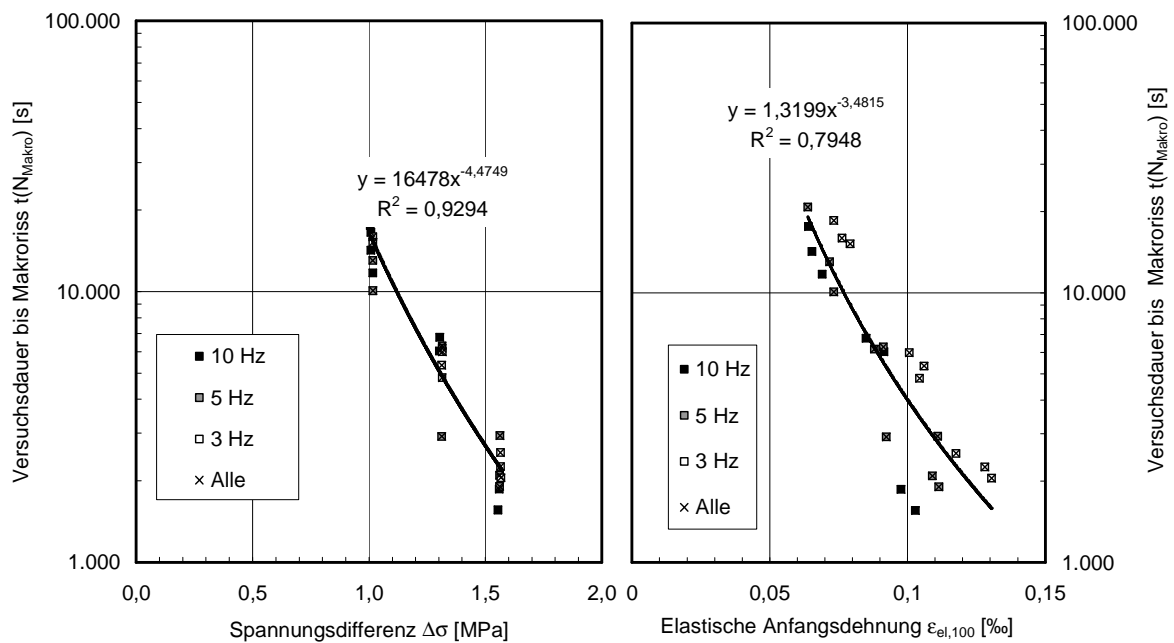


Abbildung A3-15: Zeit-Ermüdungsfunktionen – AB 0/11 S, +5 °C

A 3.4 Ermüdungsfunktionen: OPA 0/8

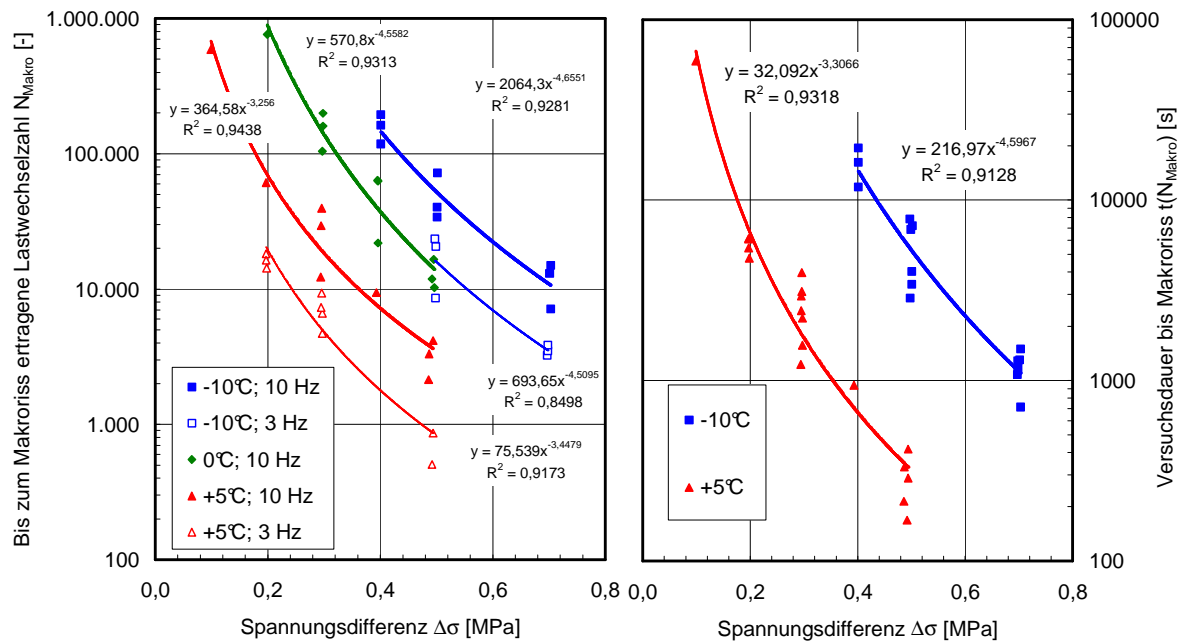


Abbildung A3-16: Ermüdungsfunktionen – OPA 0/8

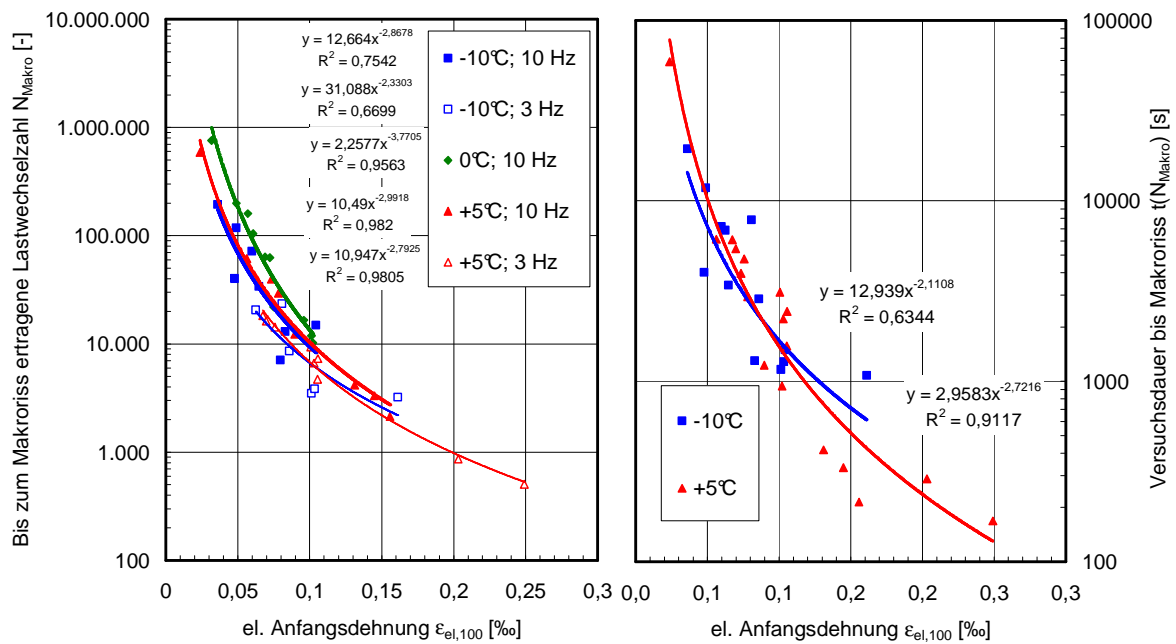


Abbildung A3-17: Dehnungsabhängige Ermüdungsfunktionen – OPA 0/8

A 3.5 Ermüdungsfunktionen: Abi 0/16 S (I)

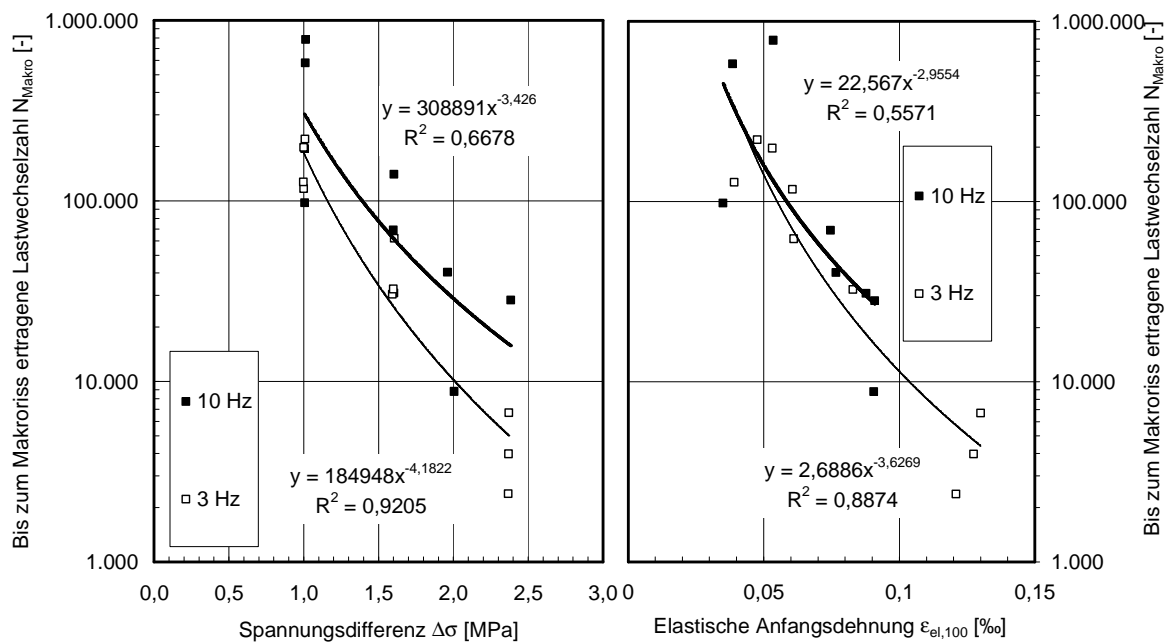


Abbildung A3-18: Ermüdungsfunktionen – ABi 0/16 S (I), -15 °C

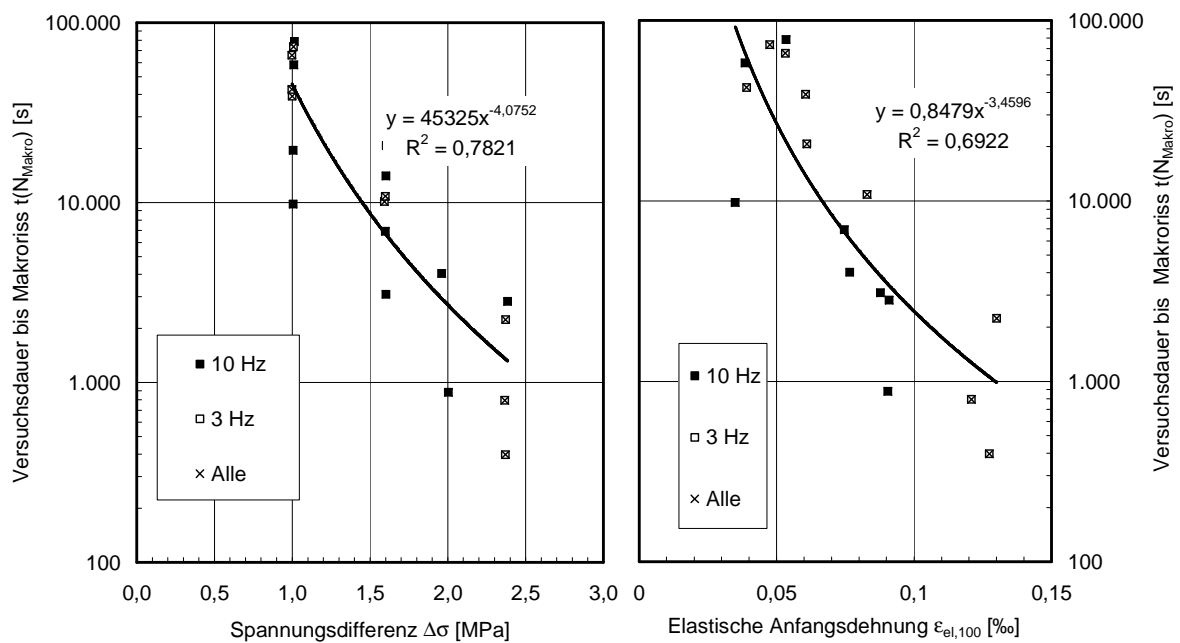


Abbildung A3-19: Zeit-Ermüdungsfunktionen – ABi 0/16 S (I), -15 °C

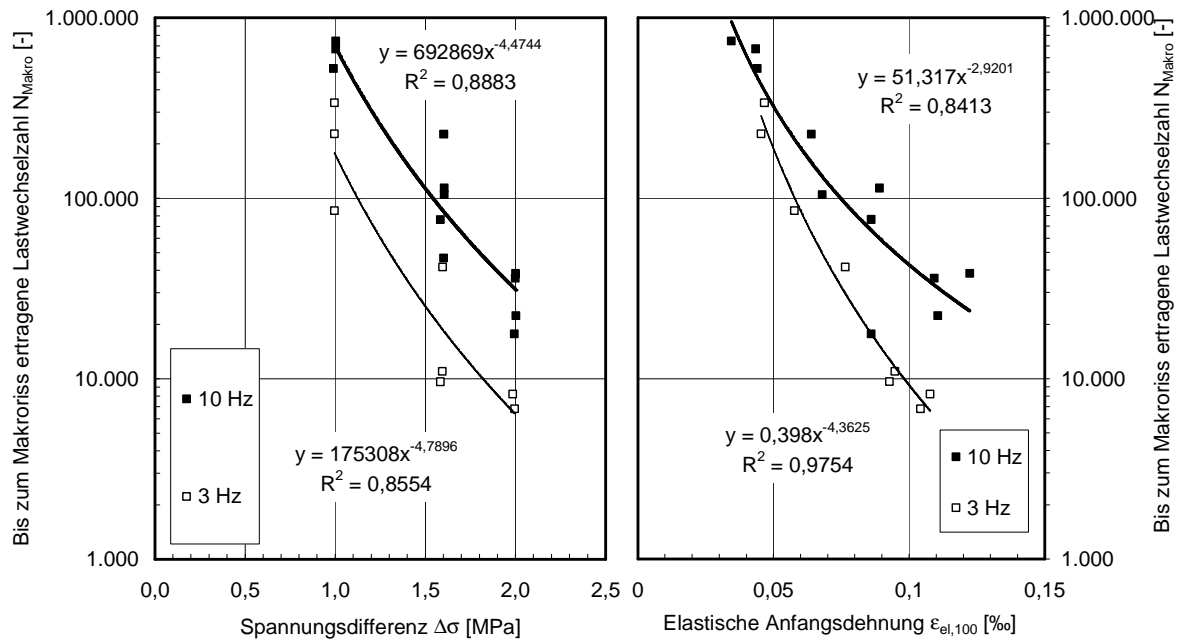


Abbildung A3-20: Ermüdungsfunktionen – ABi 0/16 S (I), -10 °C

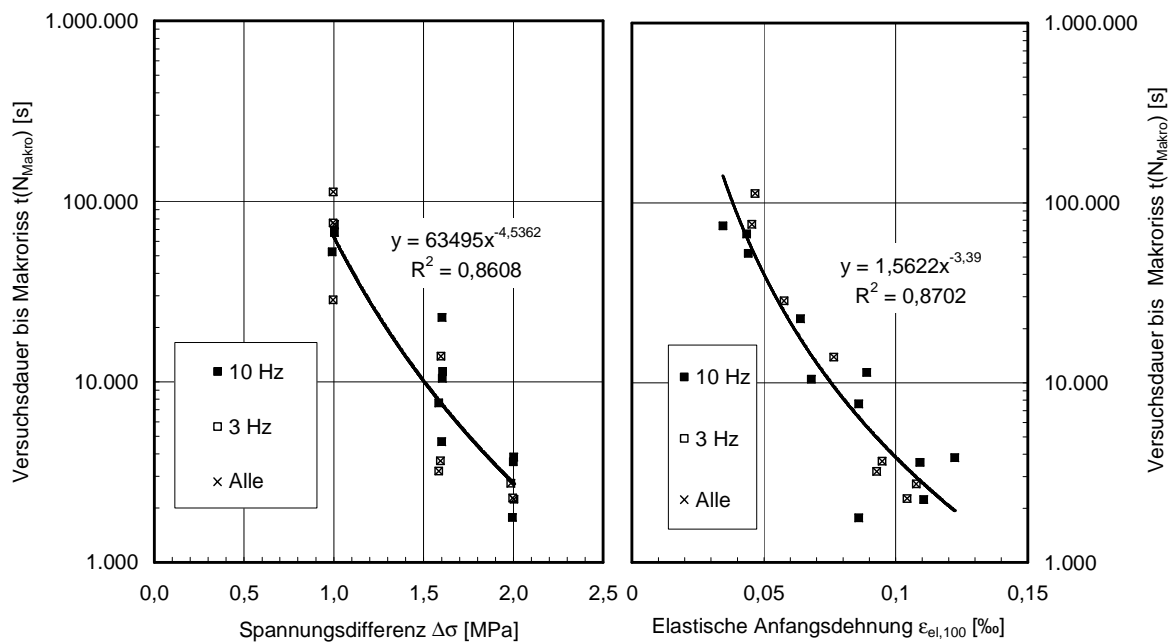


Abbildung A3-21: Zeit-Ermüdungsfunktionen – ABi 0/16 S (I), -10 °C

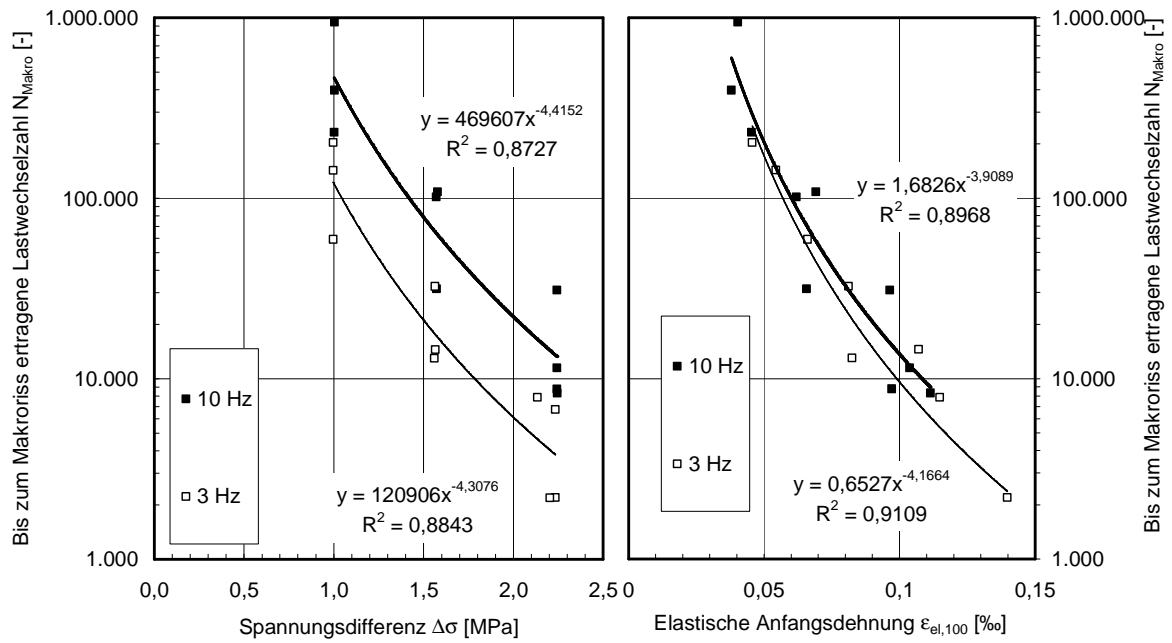


Abbildung A3-22: Ermüdungsfunktionen – ABi 0/16 S (I), -5 °C

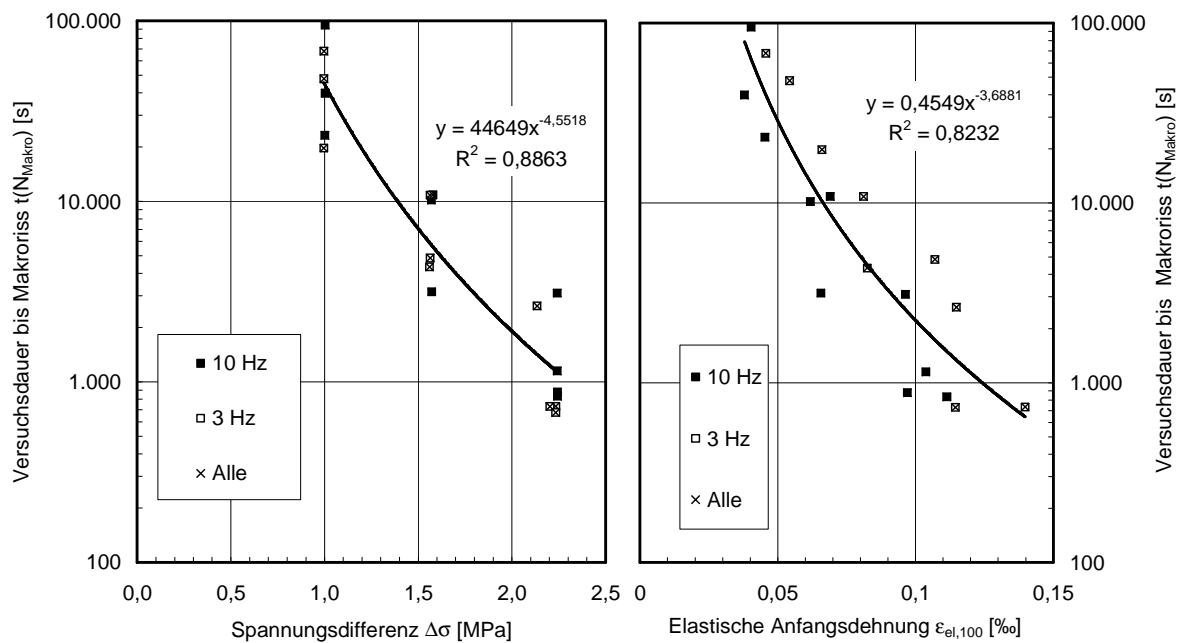


Abbildung A3-23: Zeit-Ermüdungsfunktionen – ABi 0/16 S (I), -5 °C

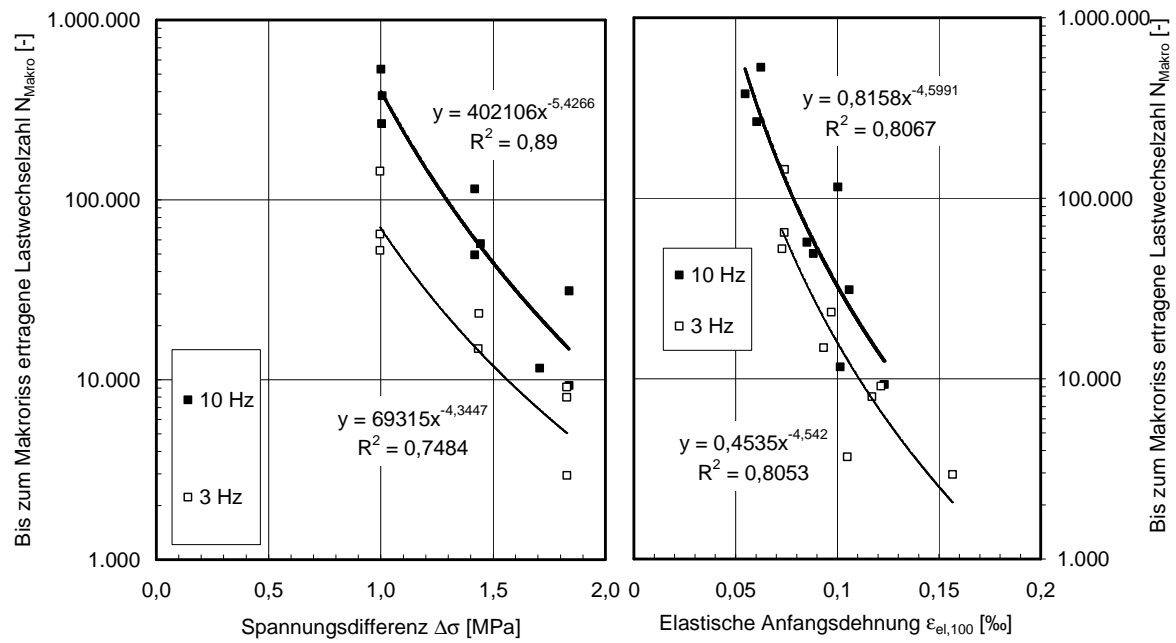


Abbildung A3-24: Ermüdungsfunktionen – ABi 0/16 S (I), 0 °C

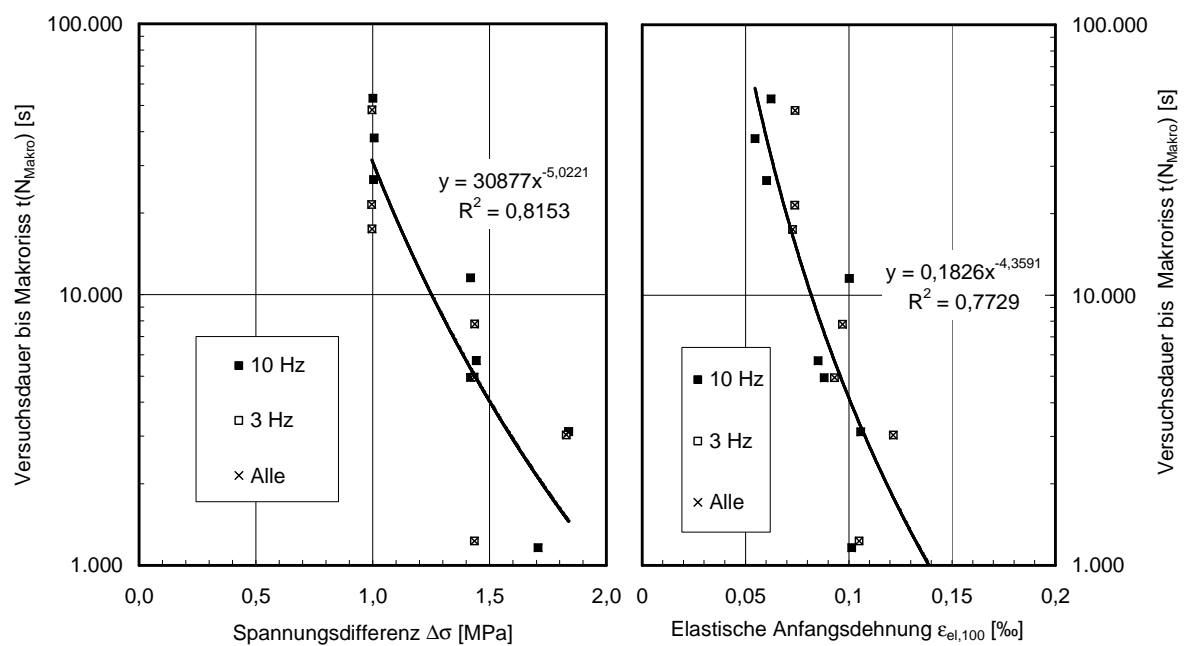


Abbildung A3-25: Zeit-Ermüdungsfunktionen – ABi 0/16 S (I), 0 °C

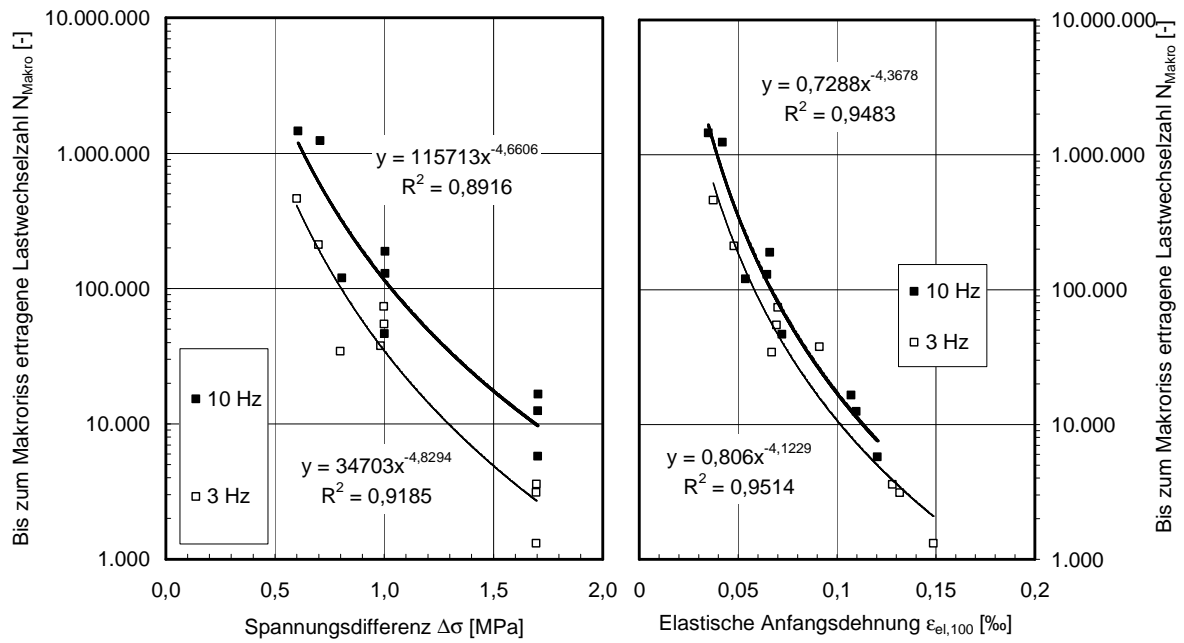


Abbildung A3-26: Ermüdungsfunktionen – ABi 0/16 S (I), +5 °C

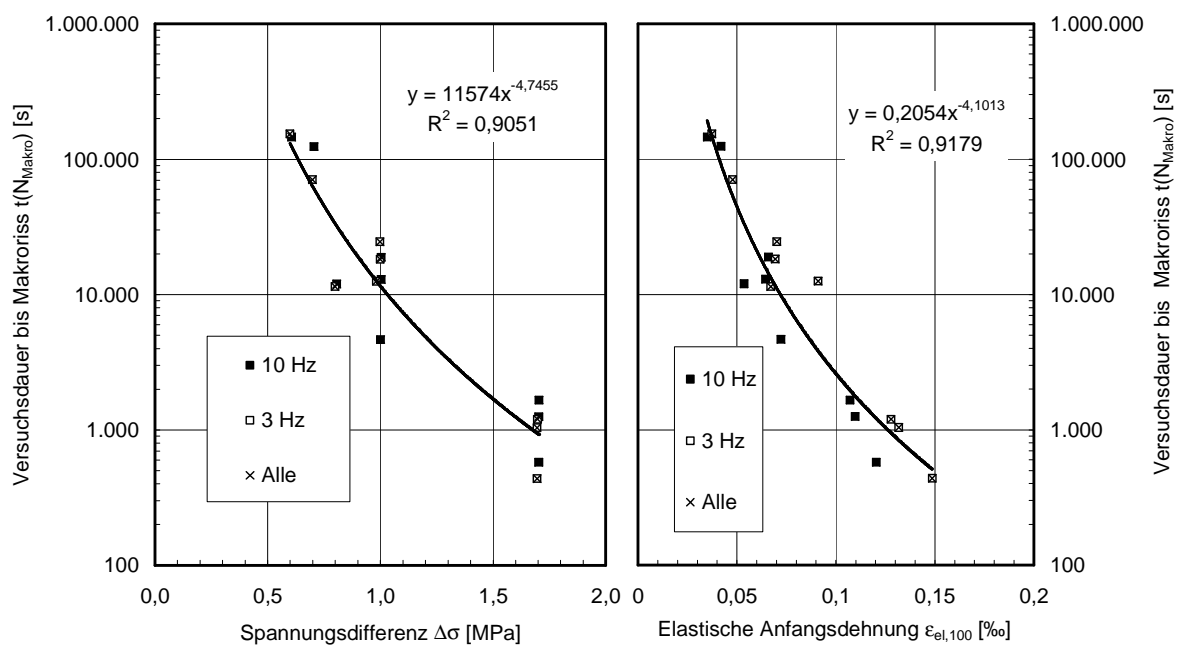


Abbildung A3-27: Zeit-Ermüdungsfunktionen – ABi 0/16 S (I), +5 °C

A 3.6 Ermüdungsfunktionen: ATS 0/32 CS

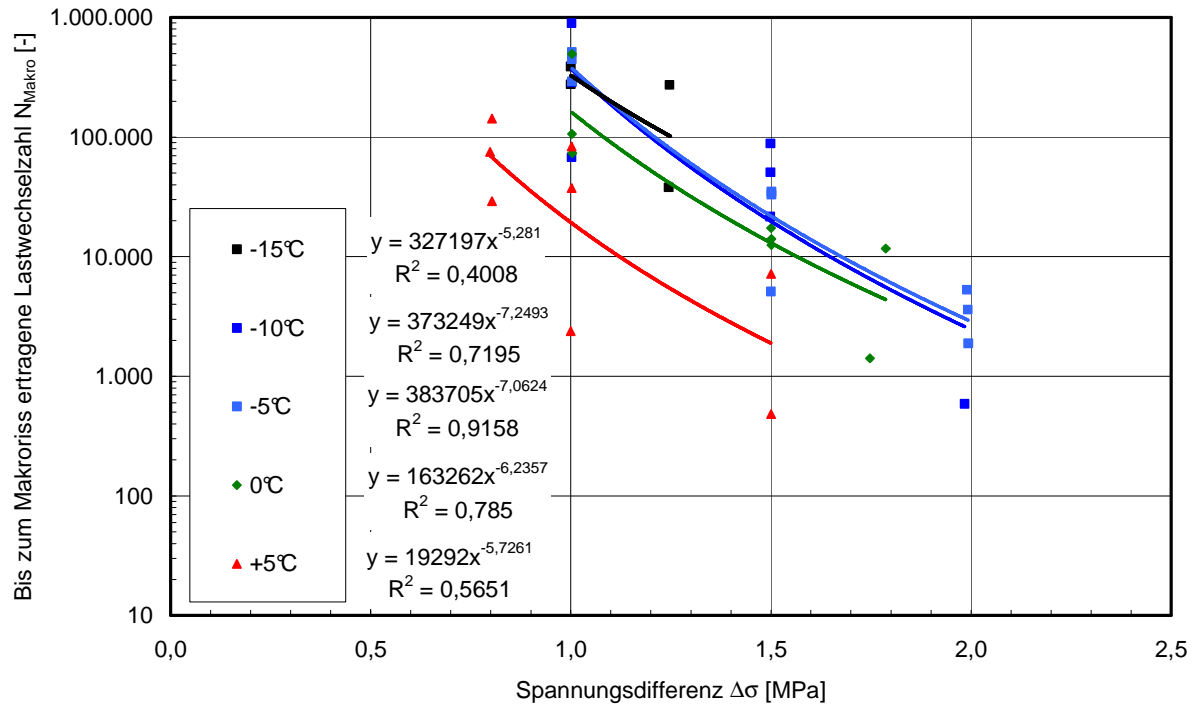


Abbildung A3-28: Ermüdungsfunktionen – ATS 0/32 CS (f = 10 Hz)

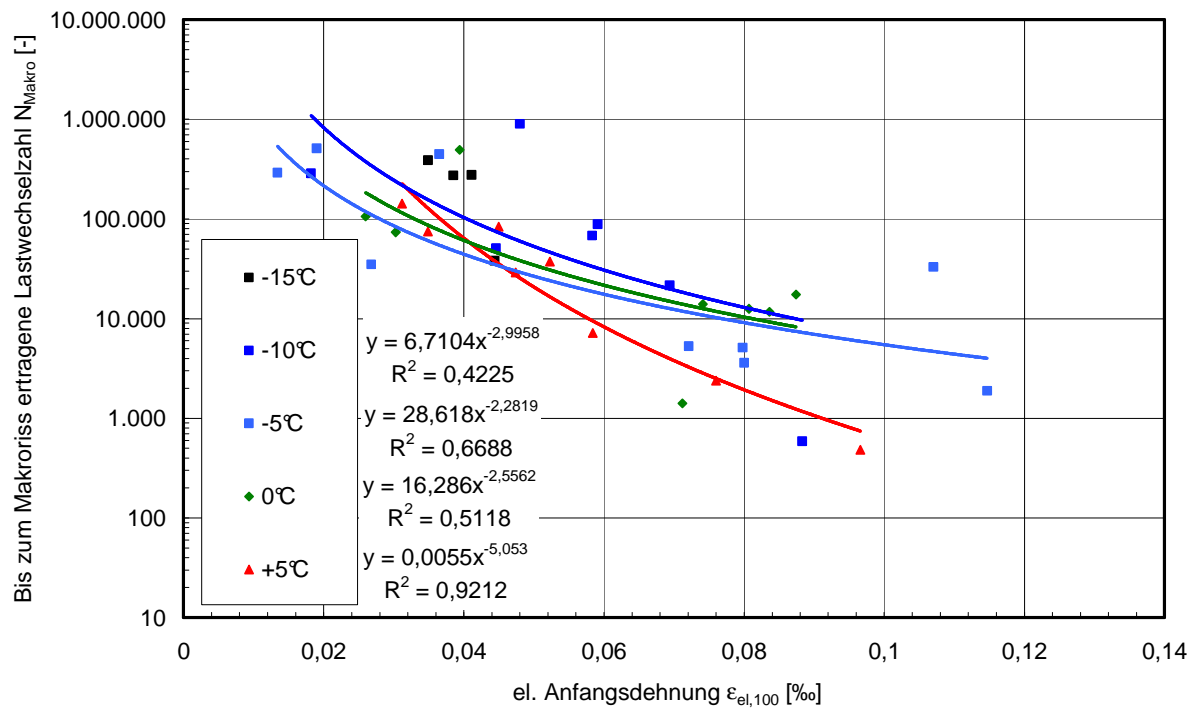


Abbildung A3-29: Ermüdungsfunktionen – ATS 0/32 CS (f = 10 Hz)

A 4 Dimensionierungs-Diagramme

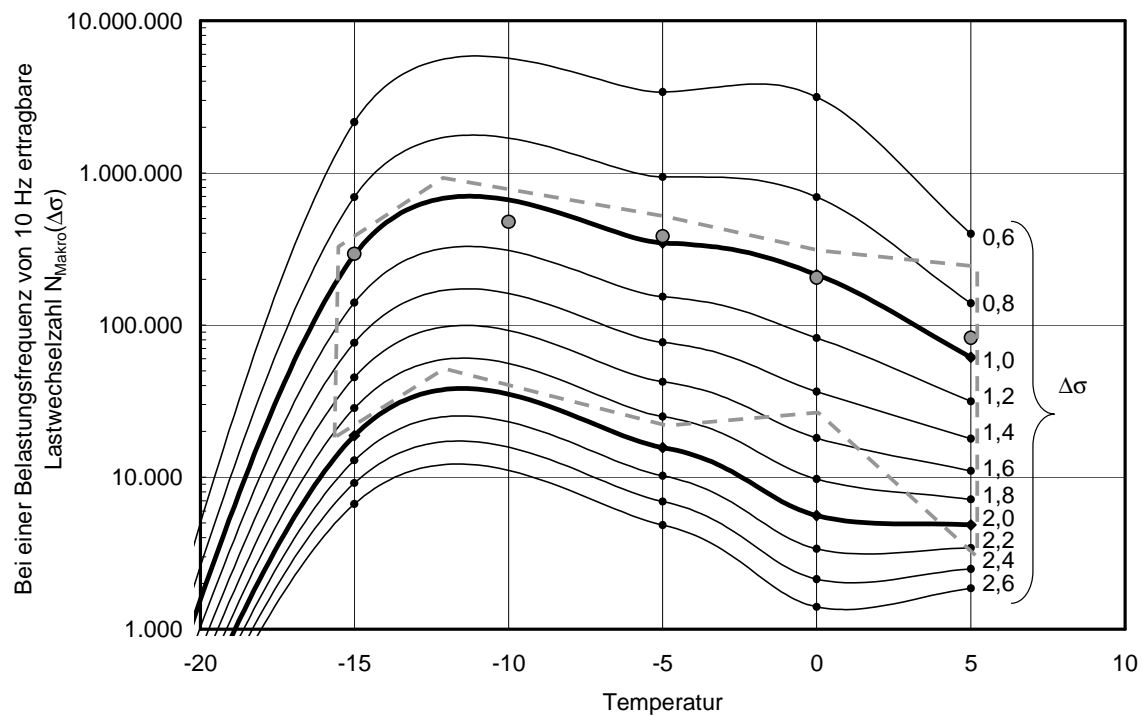


Abbildung A4-1: Anwendung der spannungsabhängigen Ermüdungskurven – SMA 0/11 S (I)

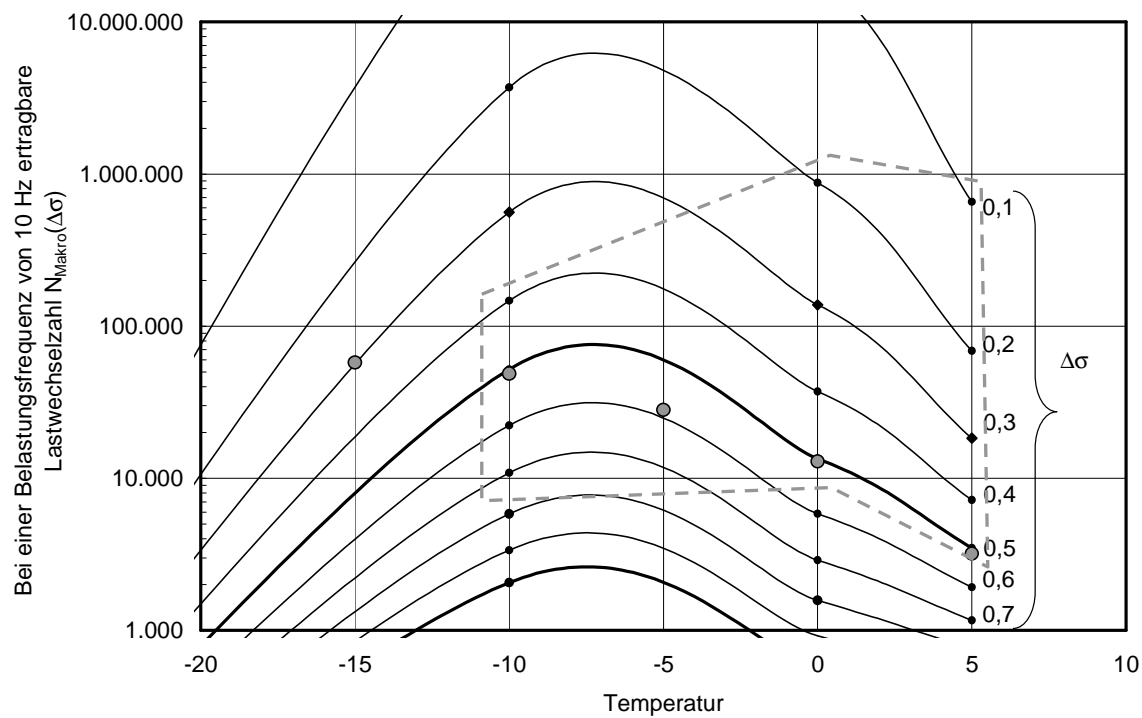


Abbildung A4-2: Anwendung der spannungsabhängigen Ermüdungskurven – OPA 0/8

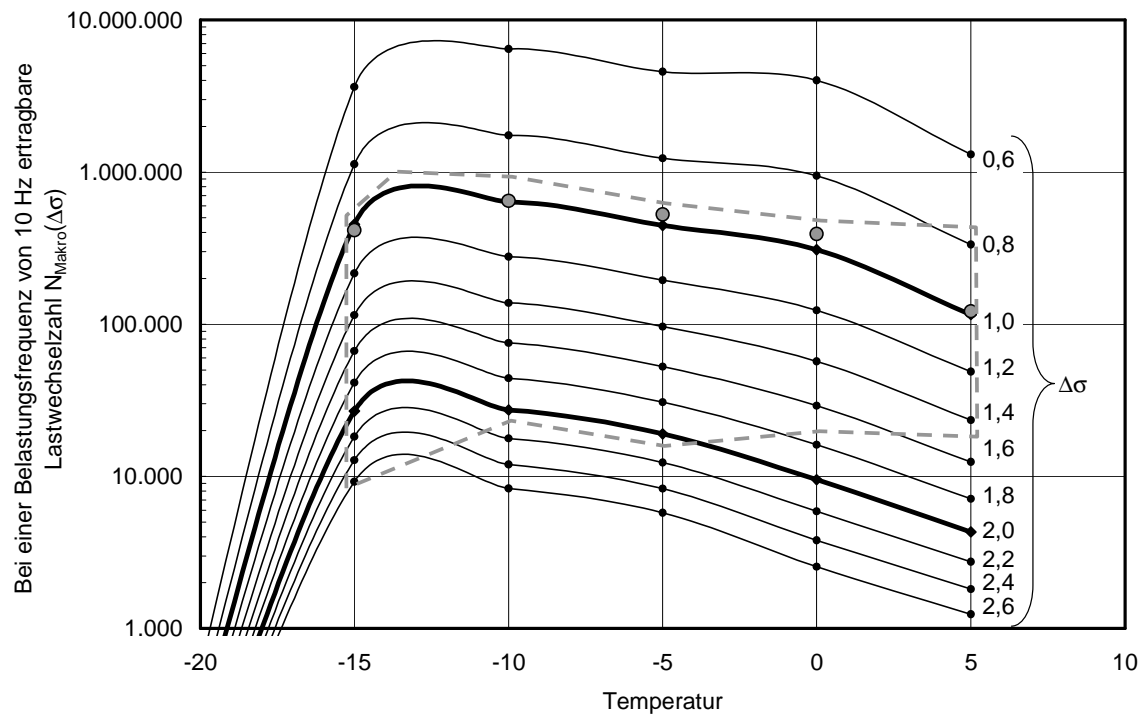


Abbildung A4-3: Anwendung der spannungsabhängigen Ermüdungskurven – ABi 0/16 S

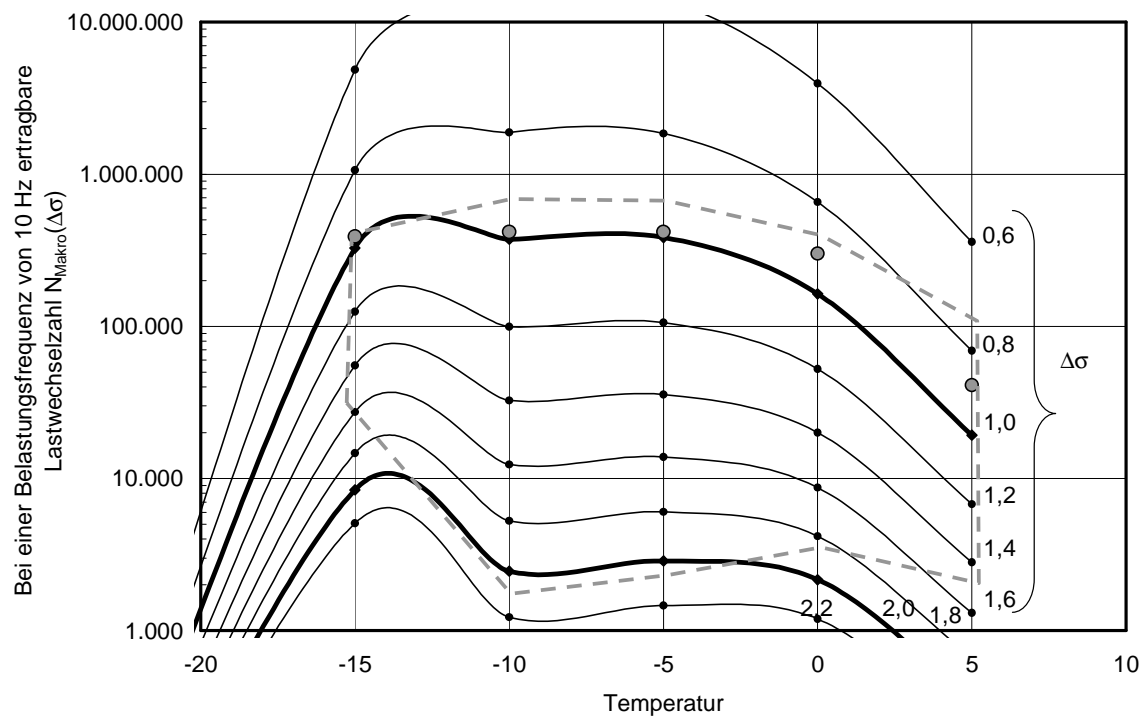


Abbildung A4-4: Anwendung der spannungsabhängigen Ermüdungskurven – ATS

A 5 Ermittlung eines einheitlichen Exponenten für Ermüdungsfunktionen

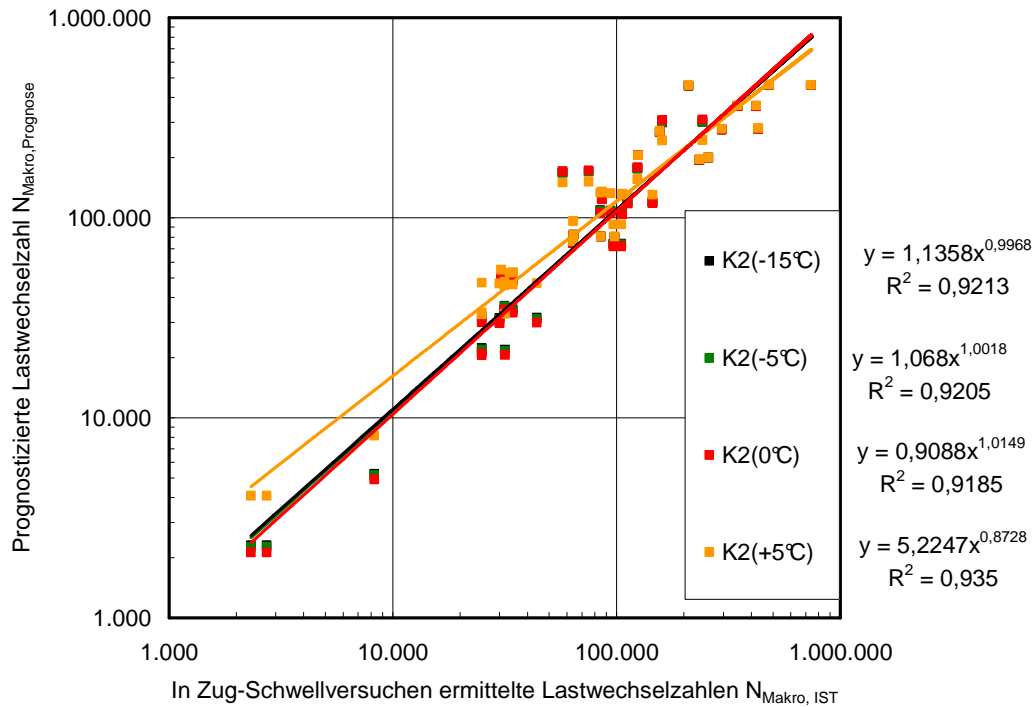


Abbildung A5-1: Bei Verwendung von Ermüdungsfunktionen mit temperaturunabhängigen Exponenten K_2 erreichbare Prognosequalität (SMA 0/11 S (I))

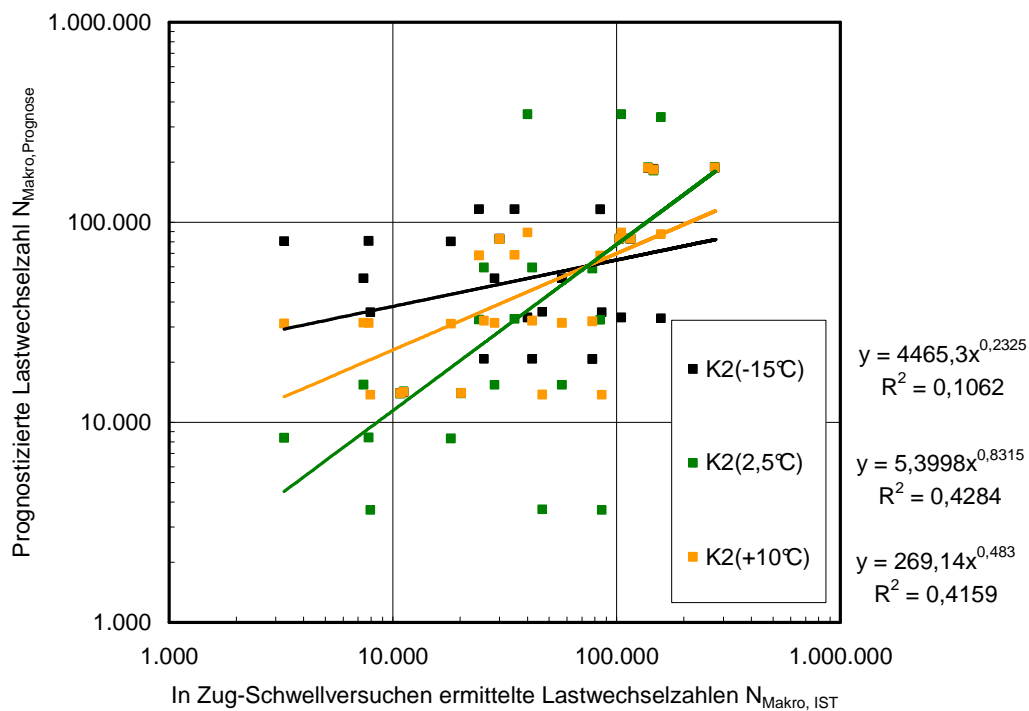


Abbildung A5-2: Bei Verwendung von Ermüdungsfunktionen mit temperaturunabhängigen Exponenten K_2 erreichbare Prognosequalität (SMA 0/11 S (III))

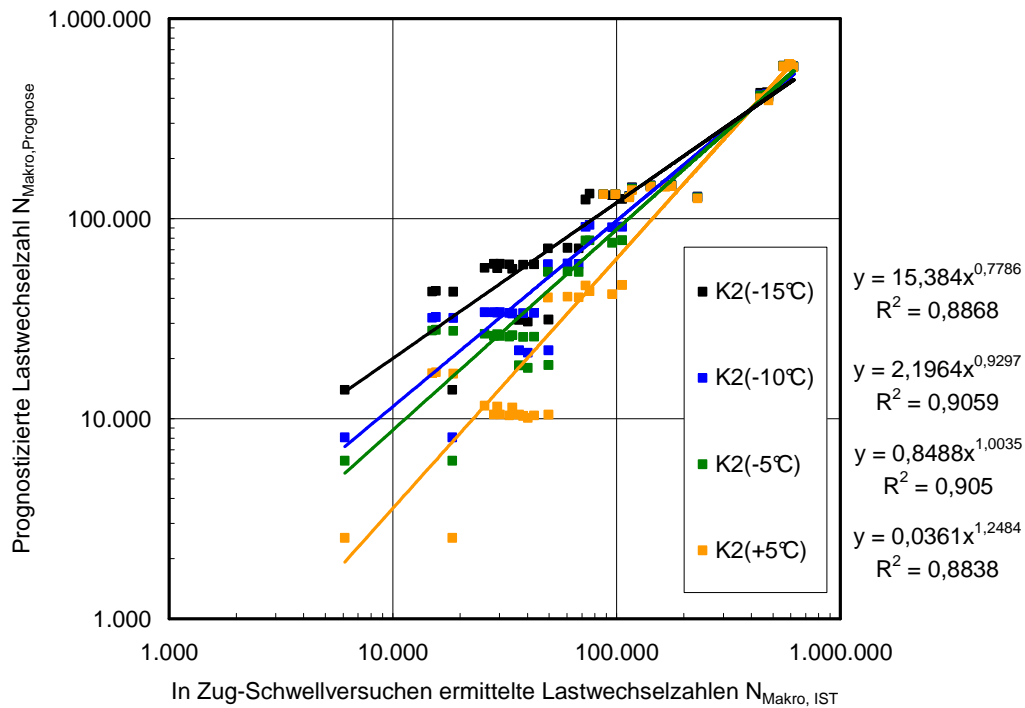


Abbildung A5-3: Bei Verwendung von Ermüdungsfunktionen mit temperaturunabhängigen Exponenten K_2 erreichbare Prognosequalität (AB 0/11 S)

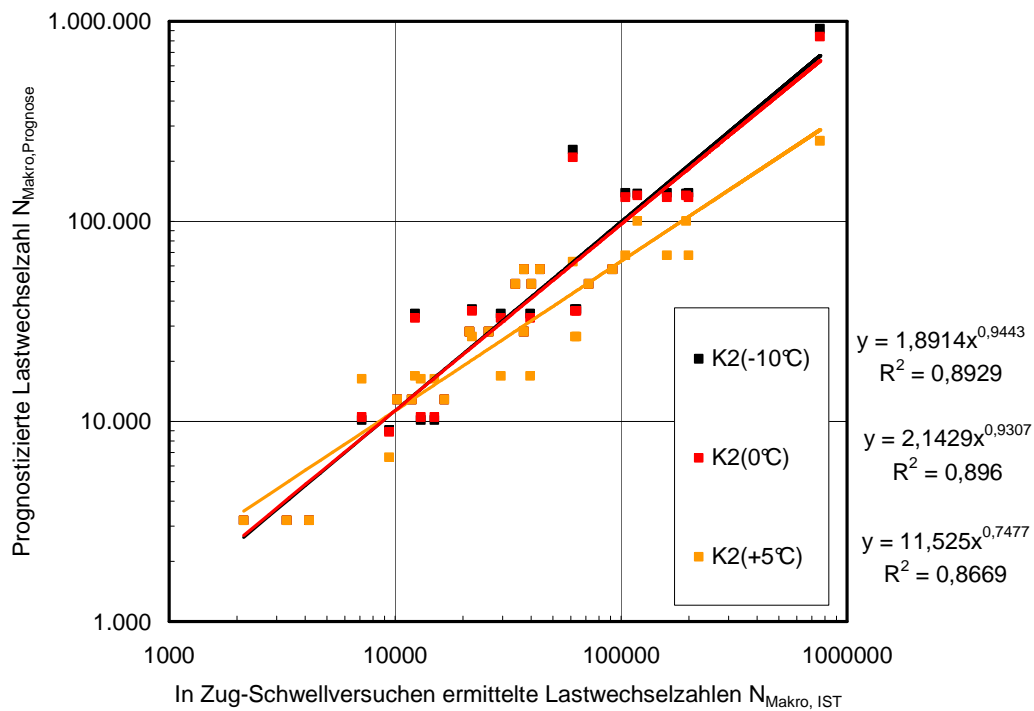


Abbildung A5-4: Bei Verwendung von Ermüdungsfunktionen mit temperaturunabhängigen Exponenten K_2 erreichbare Prognosequalität (OPA 0/8)

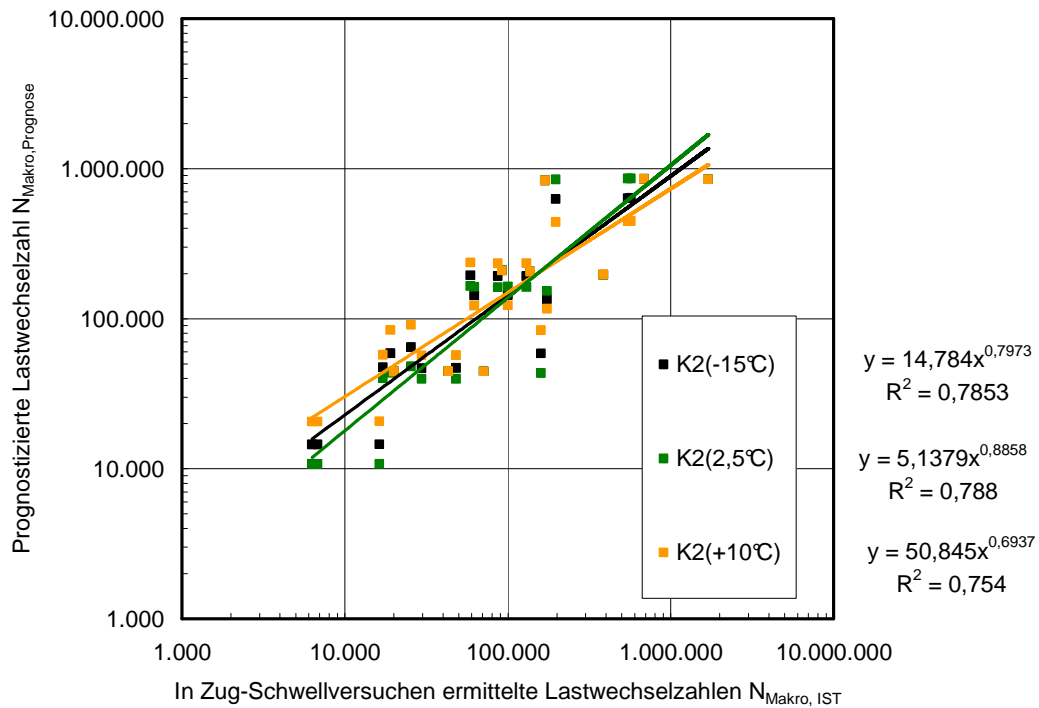


Abbildung A5-5: Bei Verwendung von Ermüdungsfunktionen mit temperaturunabhängigen Exponenten K_2 erreichbare Prognosequalität (ABi 0/16 S (II))

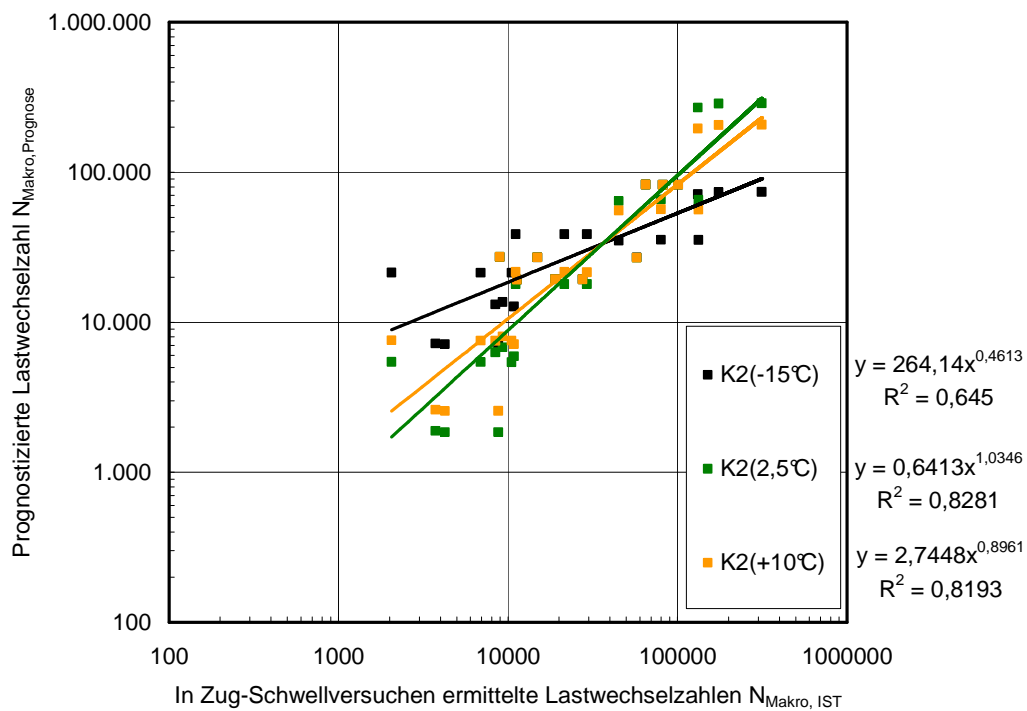


Abbildung A5-6: Bei Verwendung von Ermüdungsfunktionen mit temperaturunabhängigen Exponenten K_2 erreichbare Prognosequalität (ATS 0/22 CS)

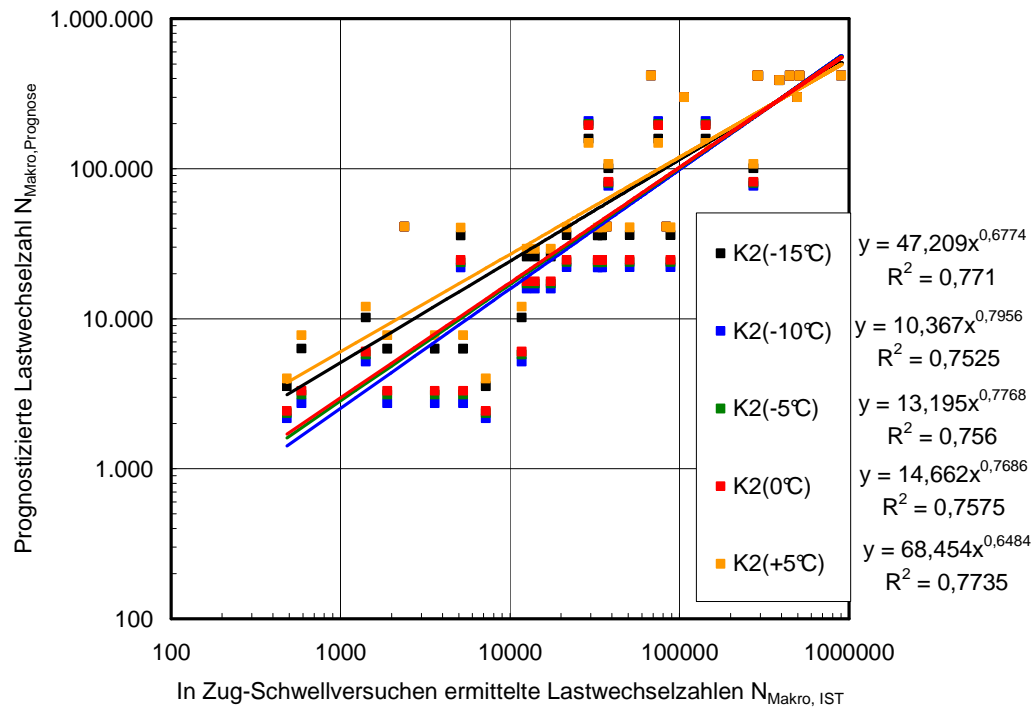


Abbildung A5-7: Bei Verwendung von Ermüdungsfunktionen mit temperaturunabhängigen Exponenten K_2 erreichbare Prognosequalität (ATS 0/32 CS)

A 6 Verlauf des absoluten E-Moduls

A 6.1 Abhängigkeit der Abnahme des absoluten E-Moduls von der Spannungsdifferenz

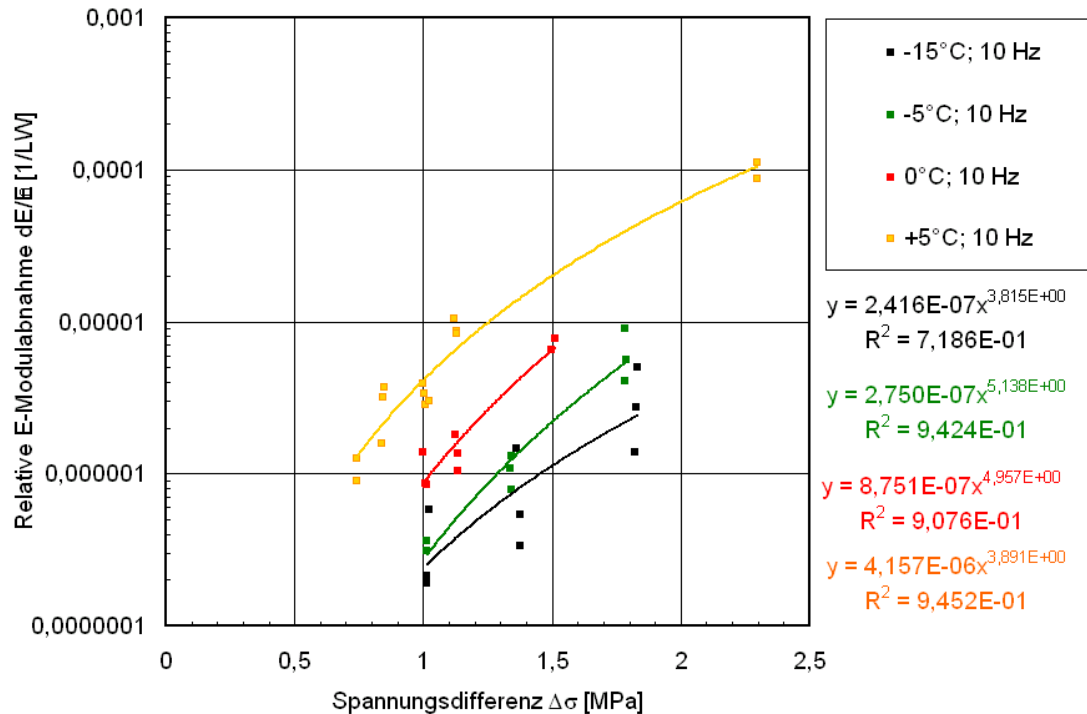


Abbildung A6-1: Abhängigkeit der Abnahme des absoluten E-Moduls von der Spannungsdifferenz SMA 0/11 S (I)

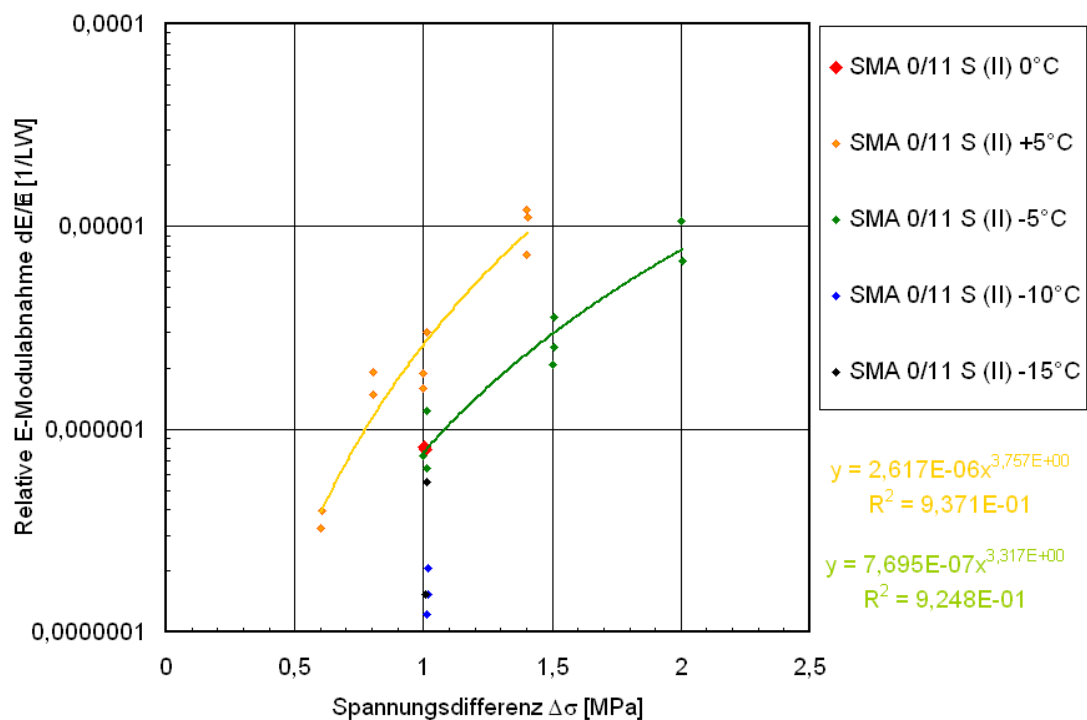


Abbildung A6-2: Abhängigkeit der Abnahme des absoluten E-Moduls von der Spannungsdifferenz SMA 0/11 S (II)

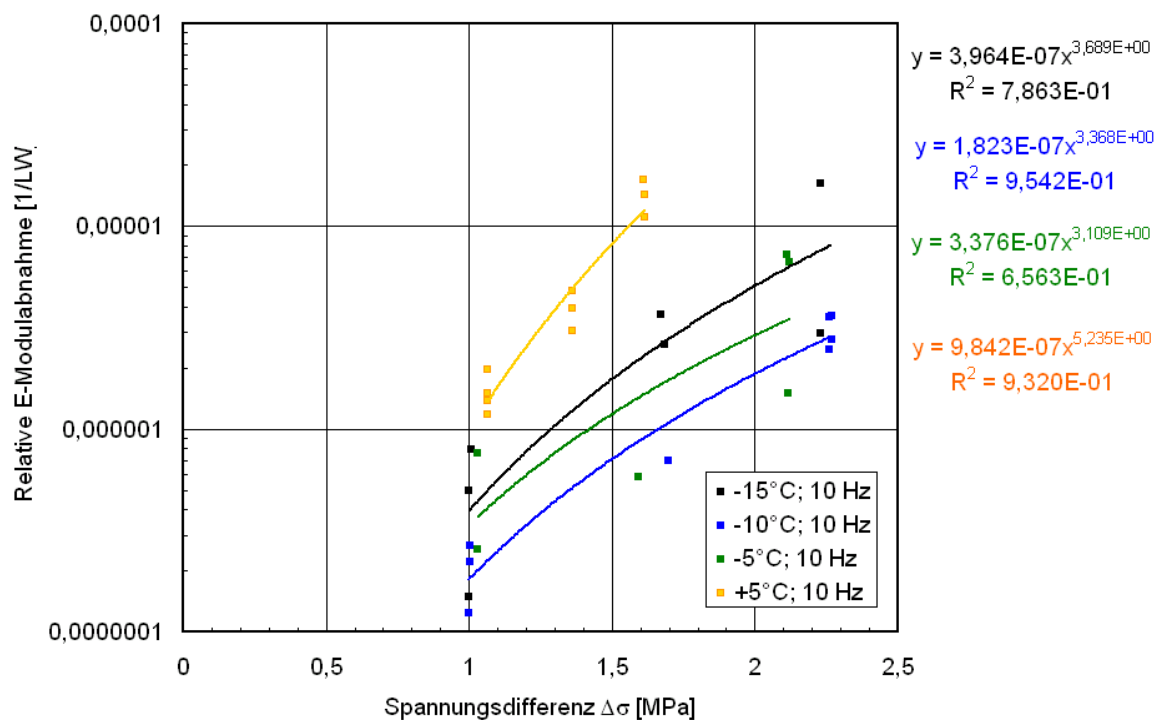


Abbildung A6-3: Abhängigkeit der Abnahme des absoluten E-Moduls von der Spannungsdifferenz AB 0/11 S

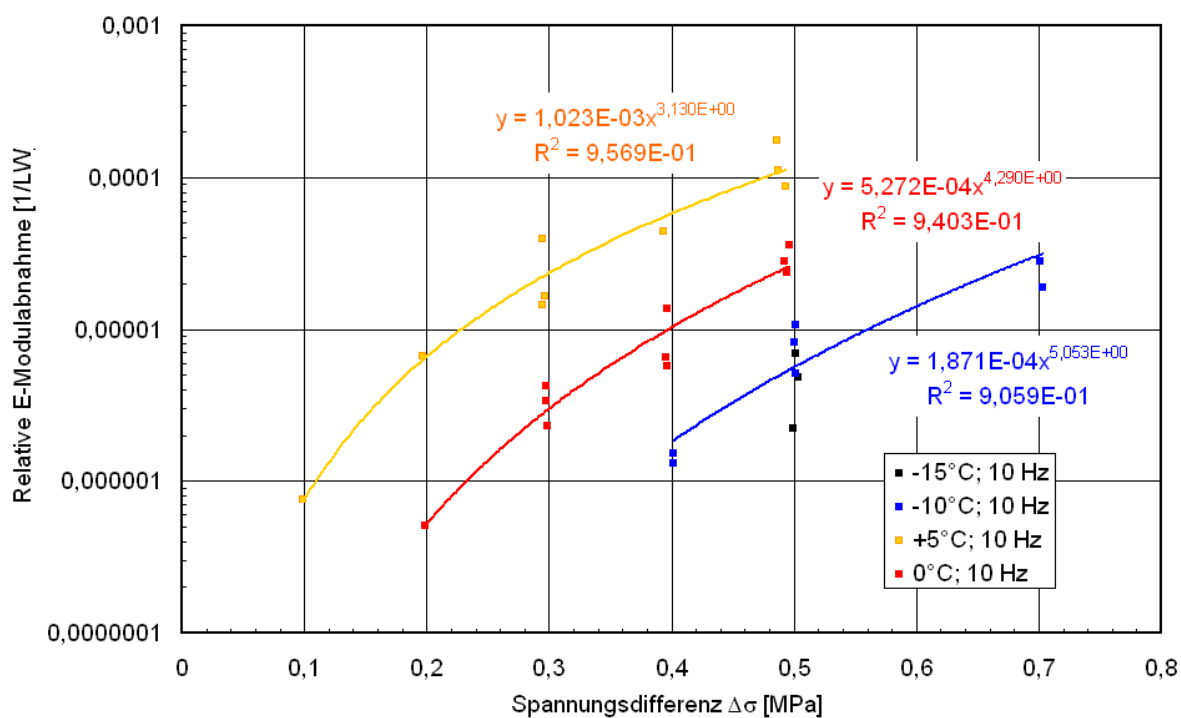


Abbildung A6-4: Abhängigkeit der Abnahme des absoluten E-Moduls von der Spannungsdifferenz (OPA 0/8)

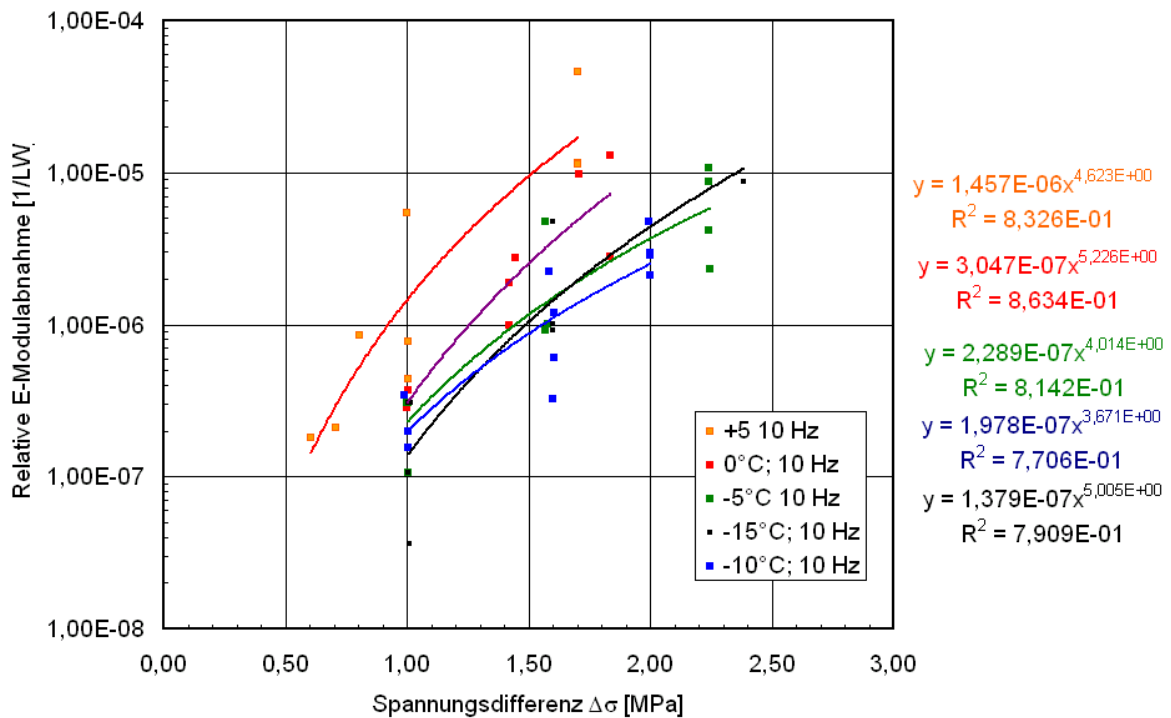


Abbildung A6-5: Abhängigkeit der Abnahme des absoluten E-Moduls von der Spannungsdifferenz (ABi 0/16 S (I))

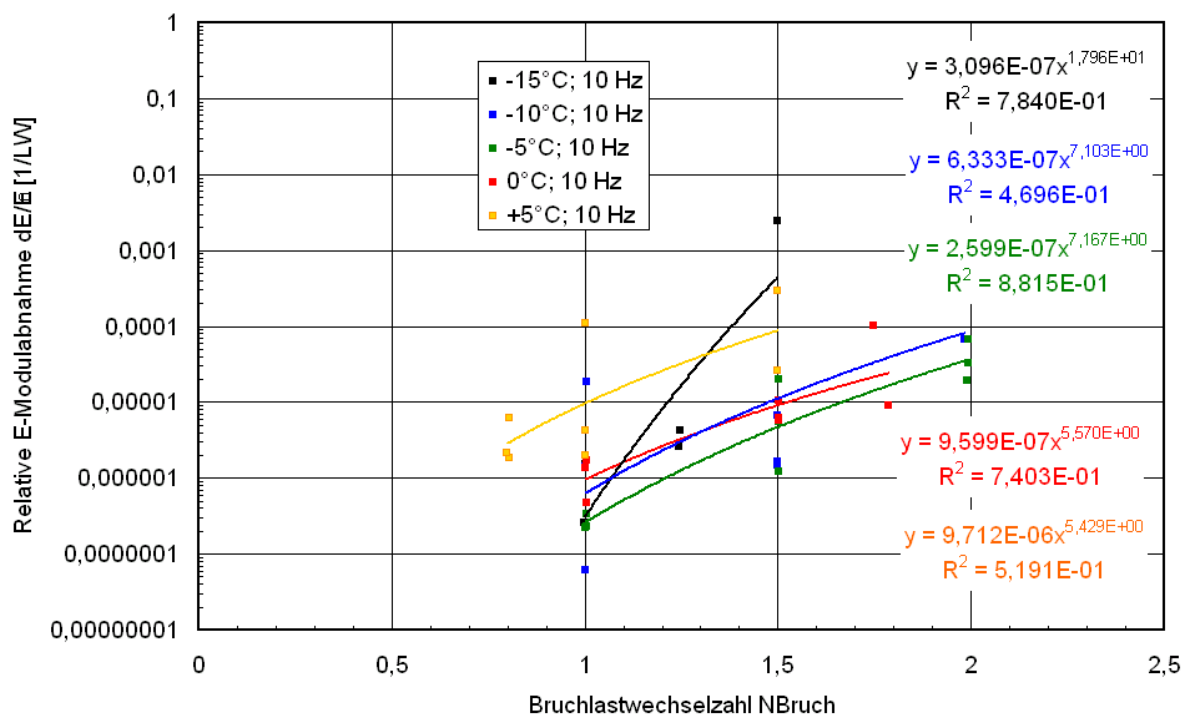


Abbildung A6-6: Abhängigkeit der Abnahme des absoluten E-Moduls von der Spannungsdifferenz (ATS 0/32 CS)

A 6.2 Zeitliche Verläufe der relativen absoluten E-Moduln

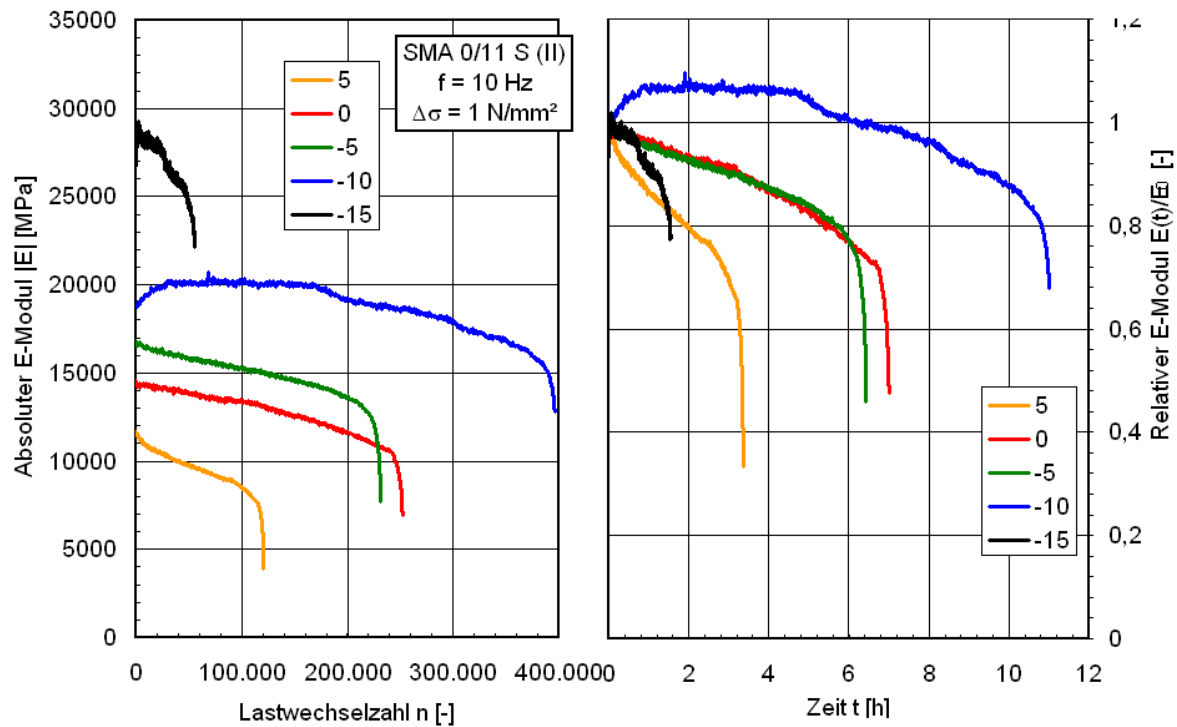


Abbildung A6-7: Gemittelter Verlauf des absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am SMA 0/11 S (II) bei verschiedenen Temperaturen über der Lastwechselzahl sowie die zeitliche Entwicklung des relativen absoluten E-Moduls

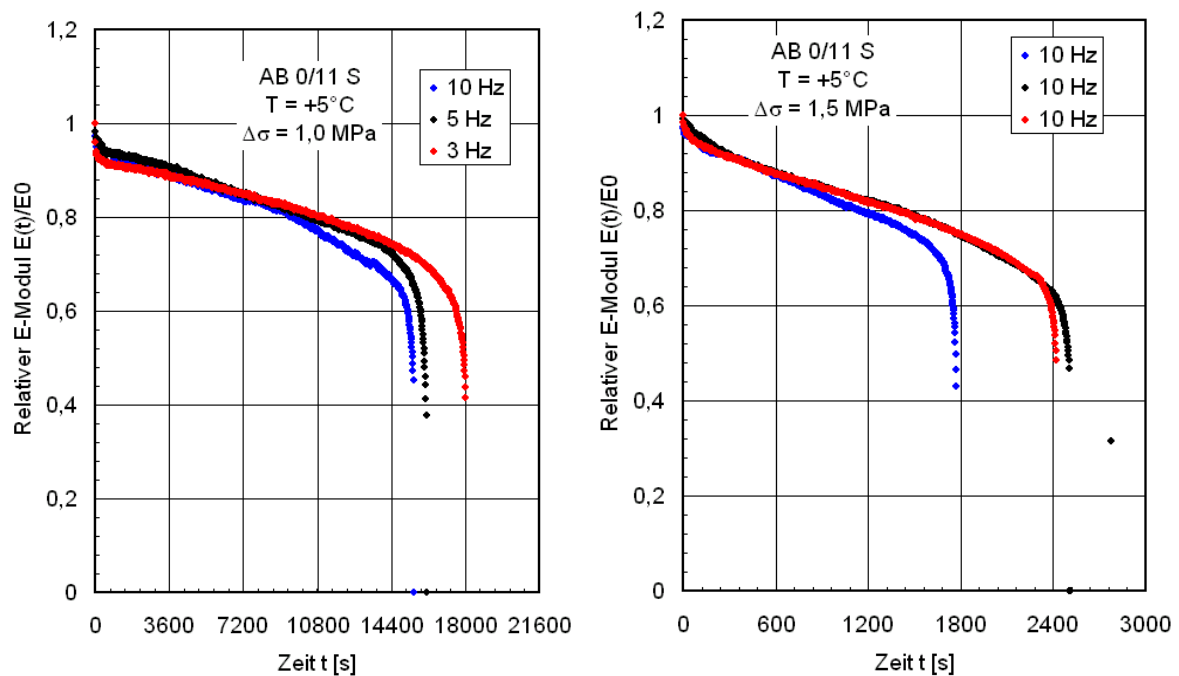


Abbildung A6-8: Zeitliche Entwicklung des relativen absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am AB 0/11 S bei $T = +5^\circ\text{C}$ und verschiedenen Frequenzen

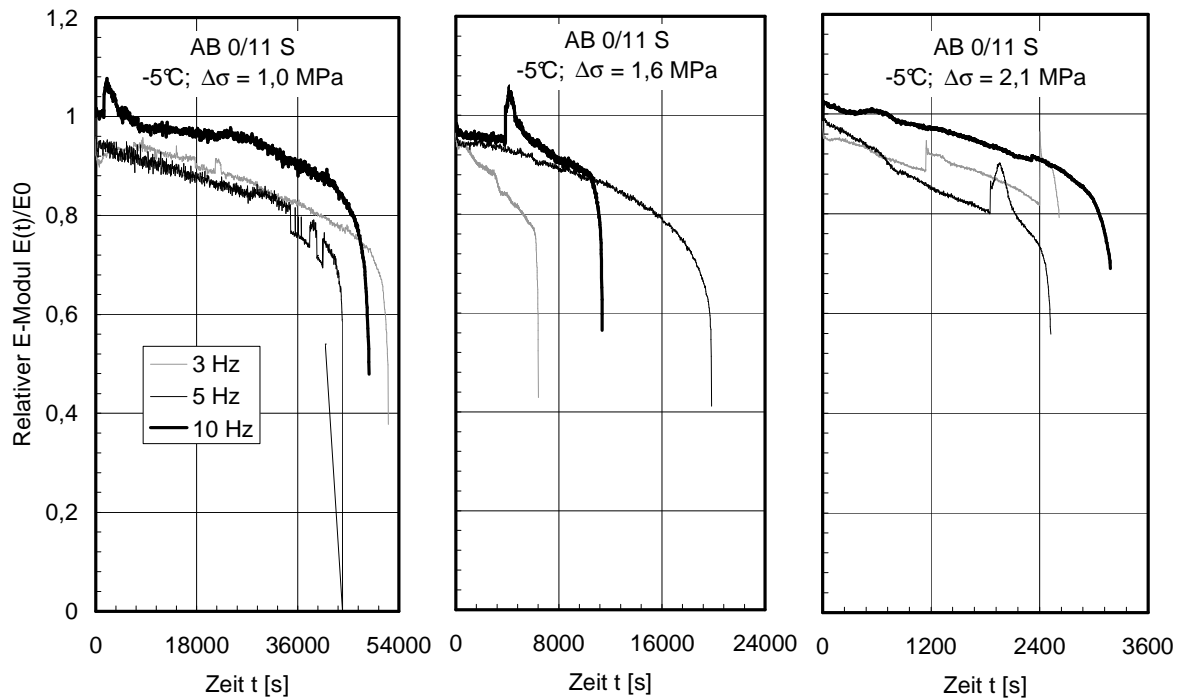


Abbildung A6-9: Zeitliche Entwicklung des relativen absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am AB 0/11 S bei $T = -5^\circ\text{C}$ und verschiedenen Frequenzen

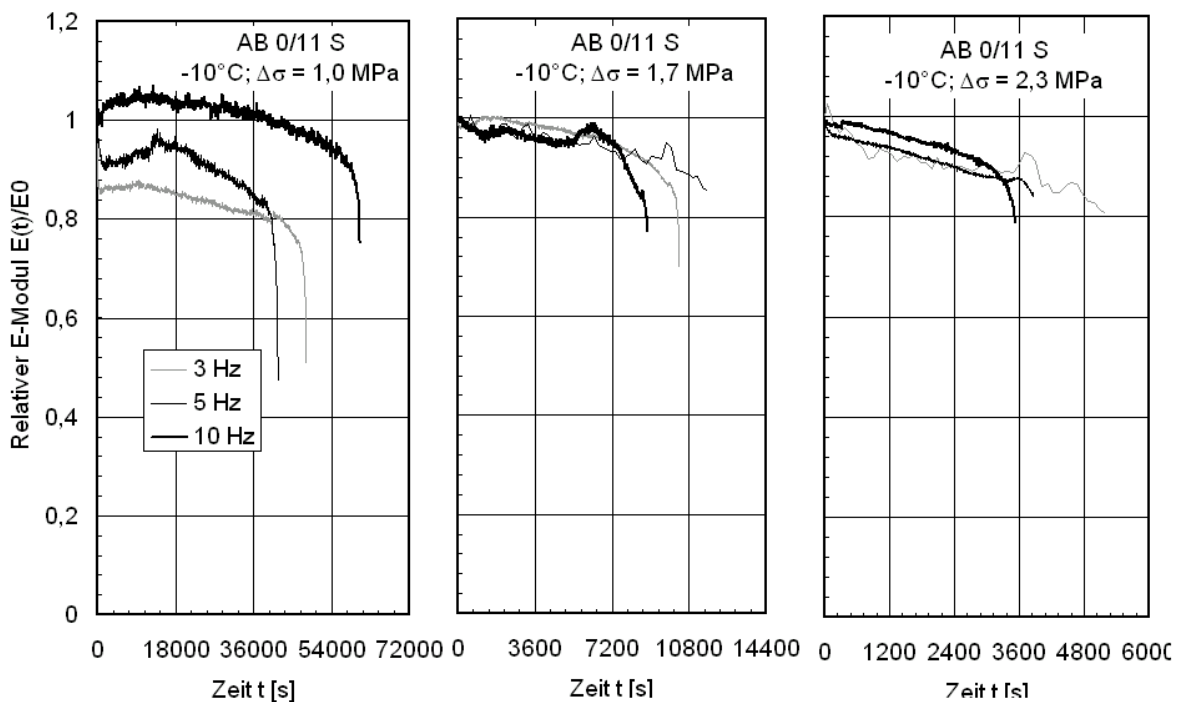


Abbildung A6-10: Zeitliche Entwicklung des relativen absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am AB 0/11 S bei $T = -10^\circ\text{C}$ und verschiedenen Frequenzen

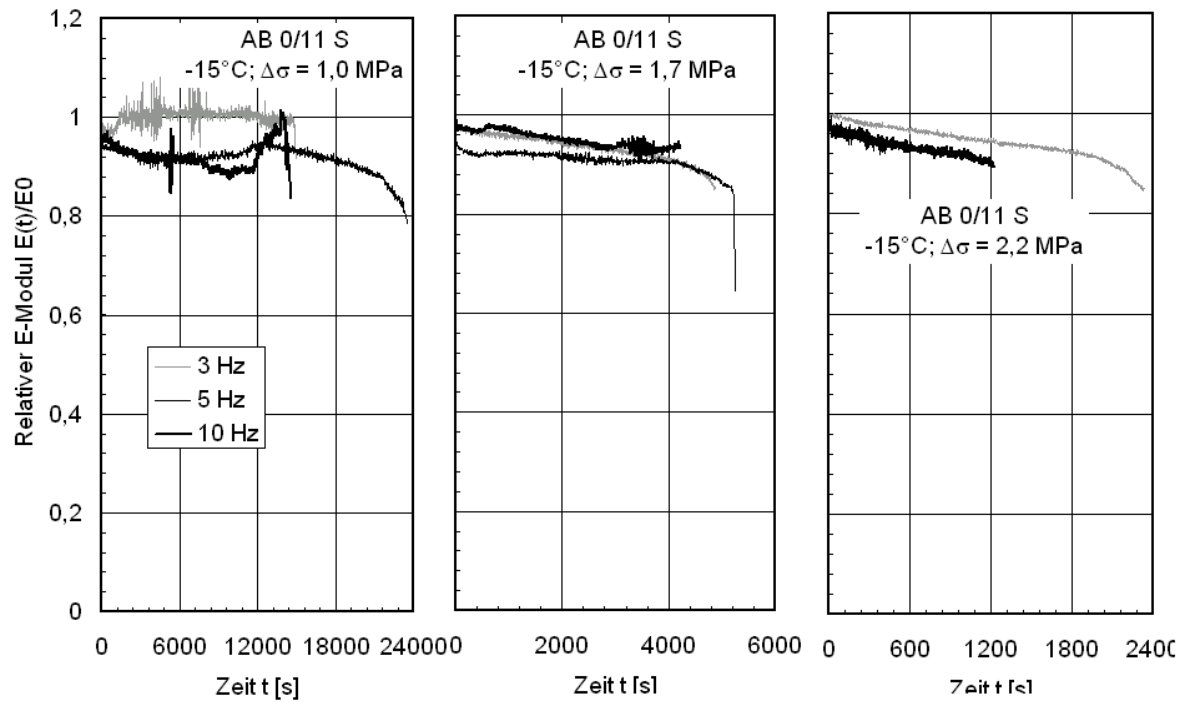


Abbildung A6-11: Zeitliche Entwicklung des relativen absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am AB 0/11 S bei $T = -15^\circ\text{C}$ und verschiedenen Frequenzen

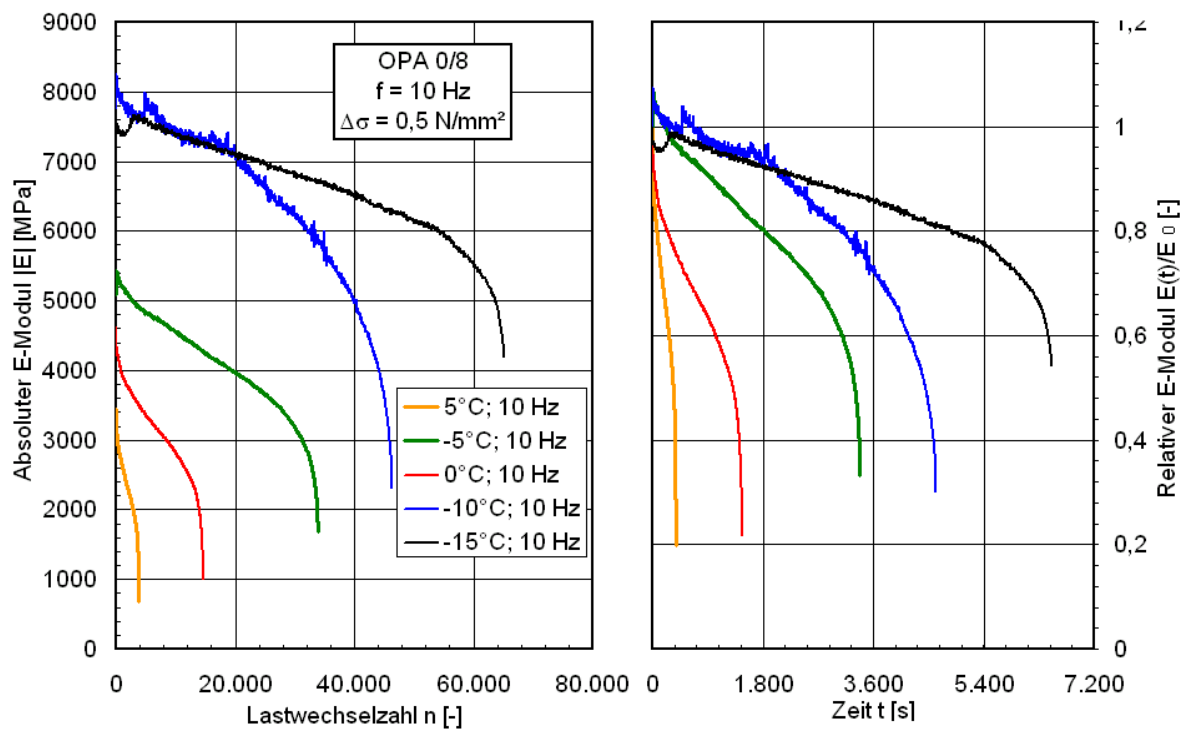


Abbildung A6-12: Gemittelter Verlauf des absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am OPA 0/8 bei verschiedenen Temperaturen über der Lastwechselzahl sowie die zeitliche Entwicklung des relativen absoluten E-Moduls

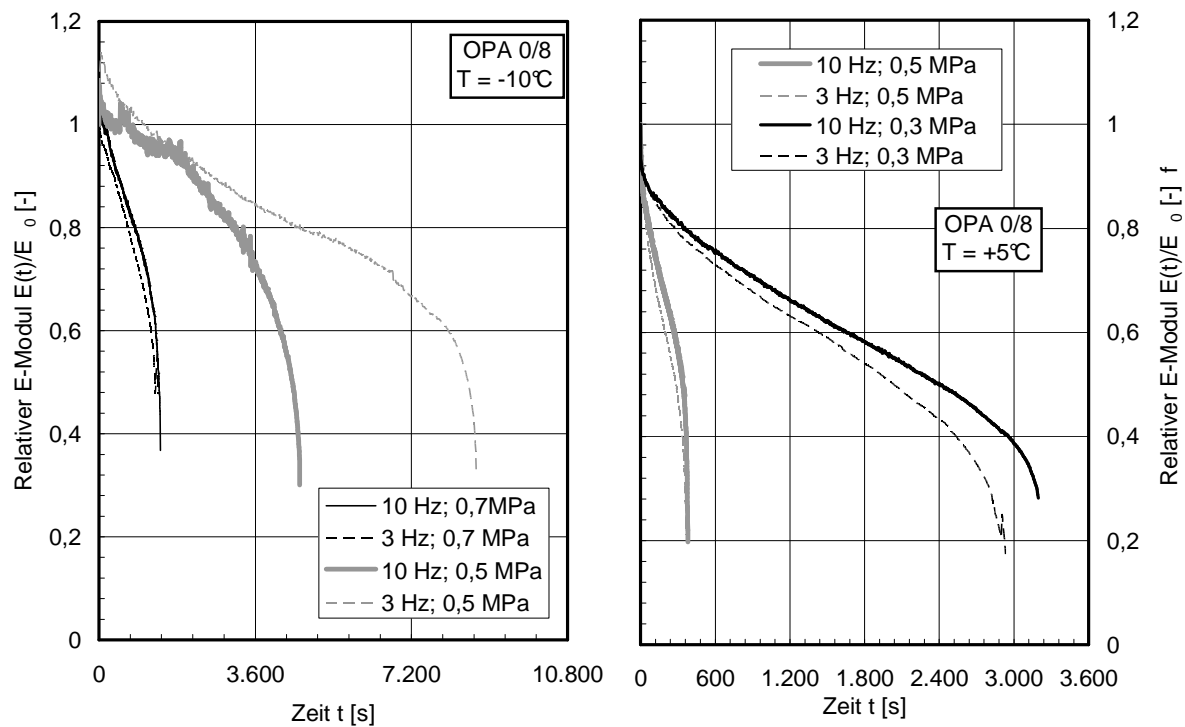


Abbildung A6-13: Zeitliche Entwicklung des relativen absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am OPA 0/8 bei T = -10°C und +5°C und verschiedenen Frequenzen

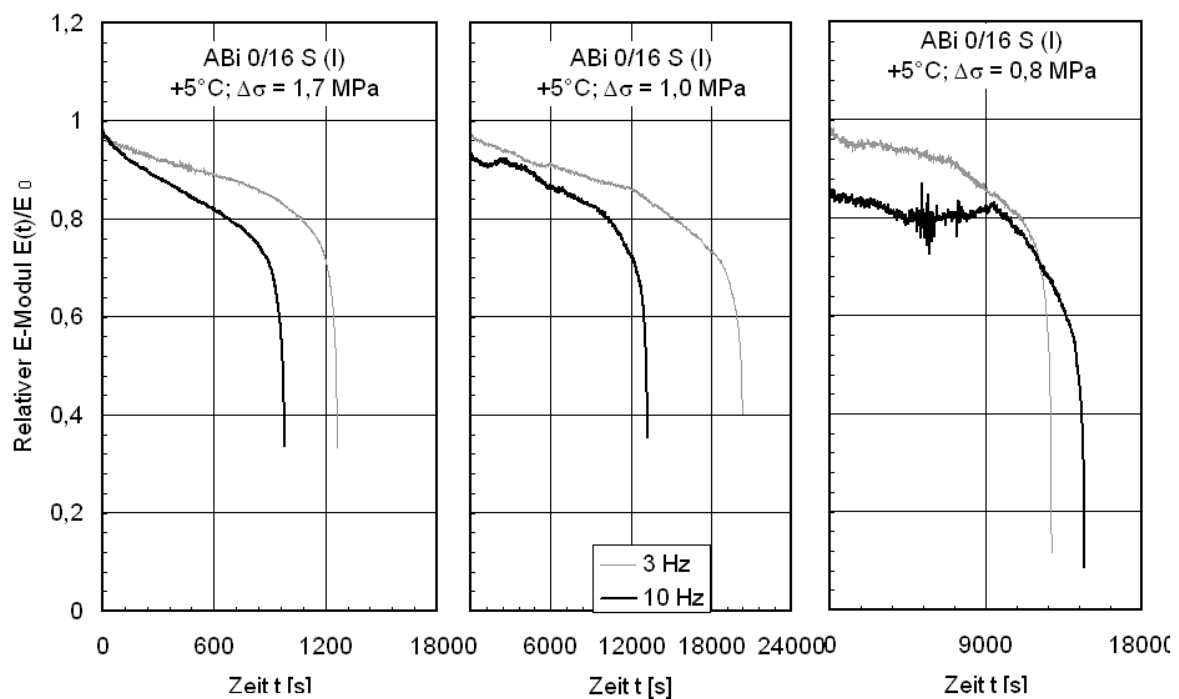


Abbildung A6-14: Zeitliche Entwicklung des relativen absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am ABi 0/16 S (I) bei T = +5°C und verschiedenen Frequenzen

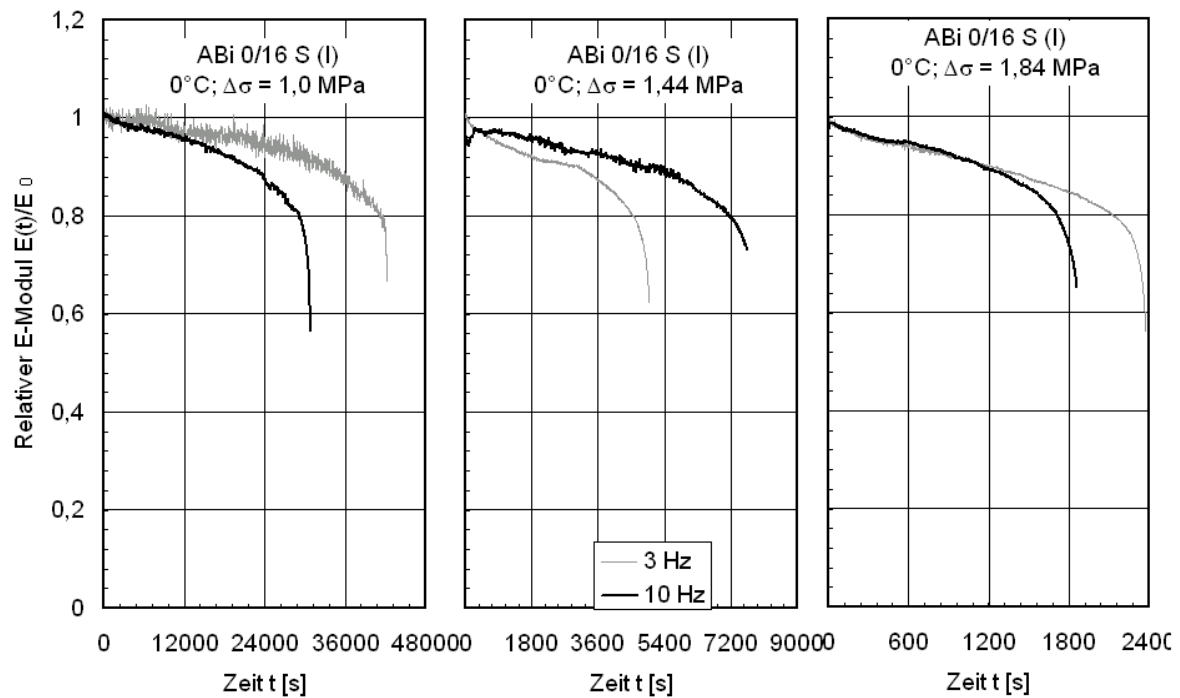


Abbildung A6-15: Zeitliche Entwicklung des relativen absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am ABi 0/16 S (I) bei $T = 0^\circ\text{C}$ und v verschiedenen Frequenzen

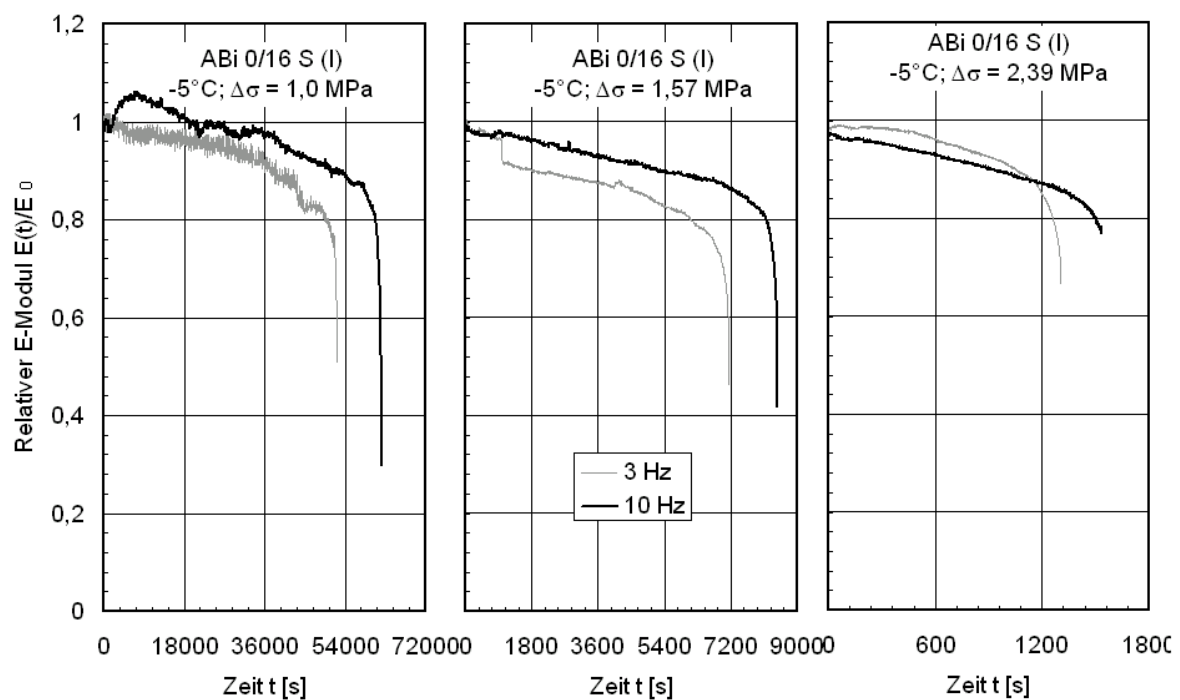


Abbildung A6-16: Zeitliche Entwicklung des relativen absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am ABi 0/16 S (I) bei $T = -5^\circ\text{C}$ und v verschiedenen Frequenzen

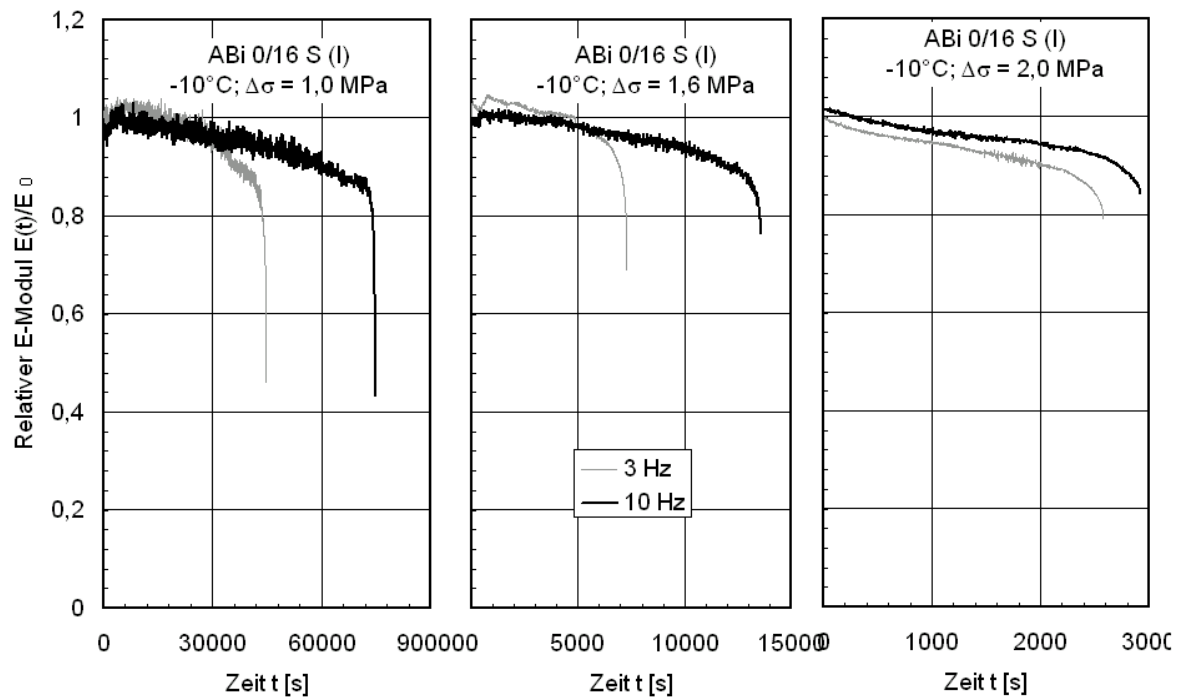


Abbildung A6-17: Zeitliche Entwicklung des relativen absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am ABi 0/16 S (I) bei $T = -10^\circ\text{C}$ und verschiedenen Frequenzen

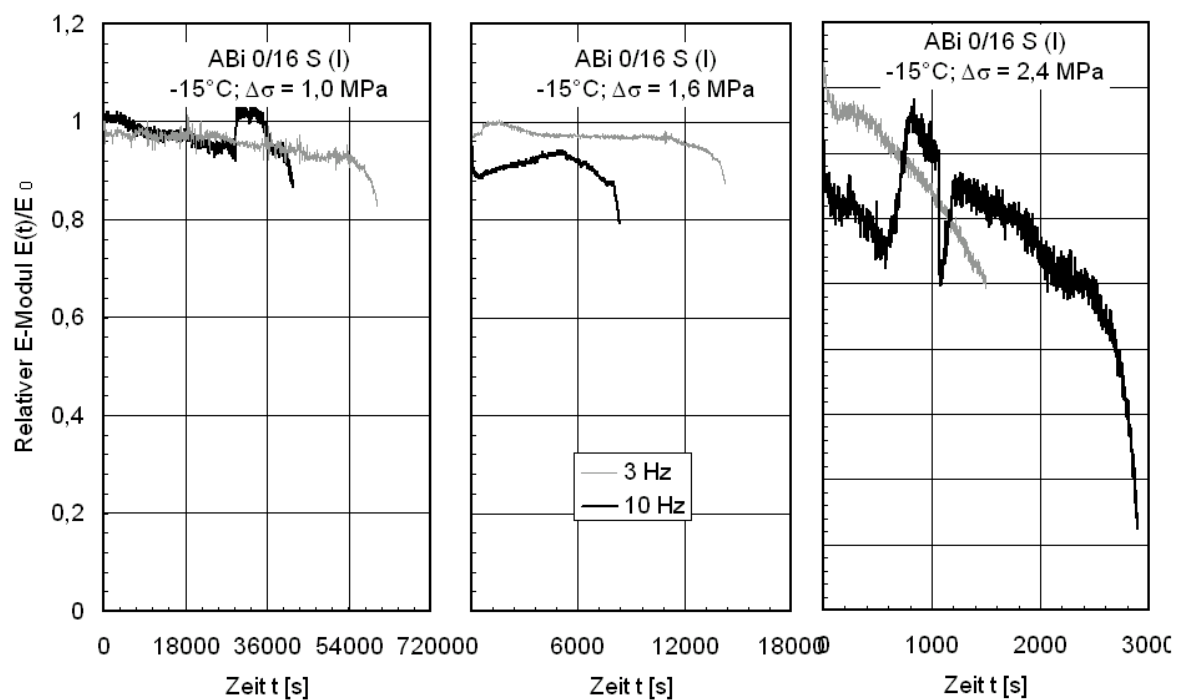


Abbildung A6-18: Zeitliche Entwicklung des relativen absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am ABi 0/16 S (I) bei $T = -15^\circ\text{C}$ und verschiedenen Frequenzen

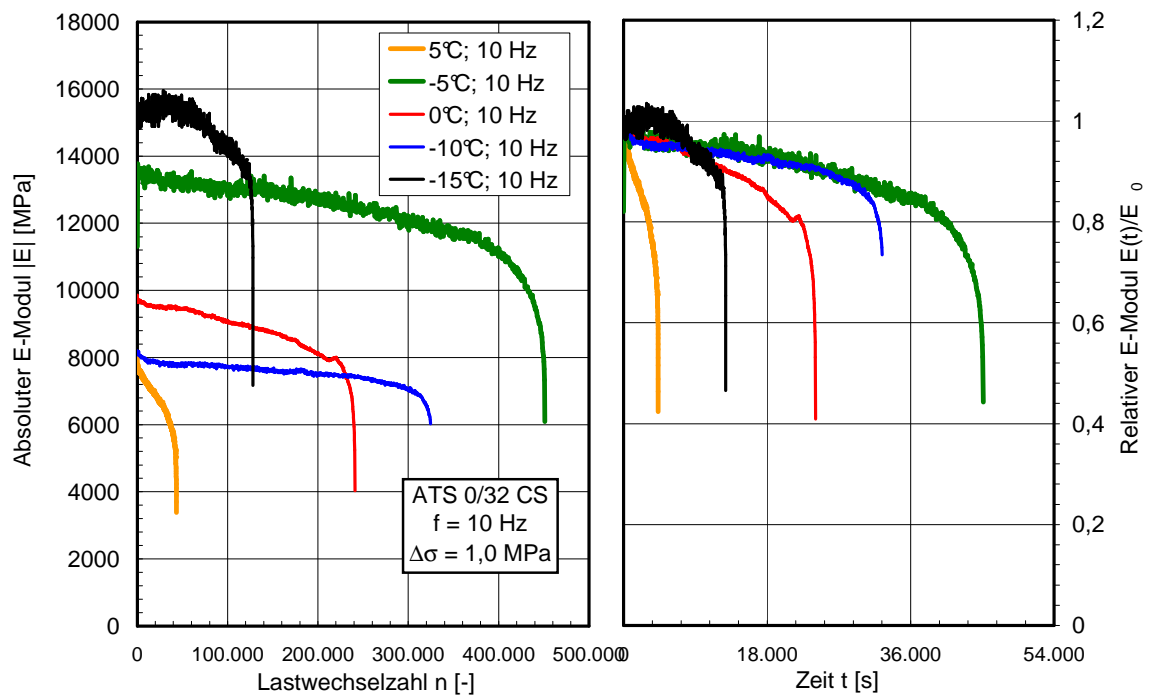


Abbildung A6-19: Gemittelter Verlauf des absoluten E-Moduls in Zug-Schwellversuche am OPA 0/8 bei verschiedenen Temperaturen über der Lastwechselzahl sowie die zeitliche Entwicklung des relativen absoluten E-Moduls

A 7 Akkumulierte bleibende Dehnung im Zug-Schwellversuch

A 7.1 Akkumulierte bleibende Dehnung: SMA 0/11 S (I)

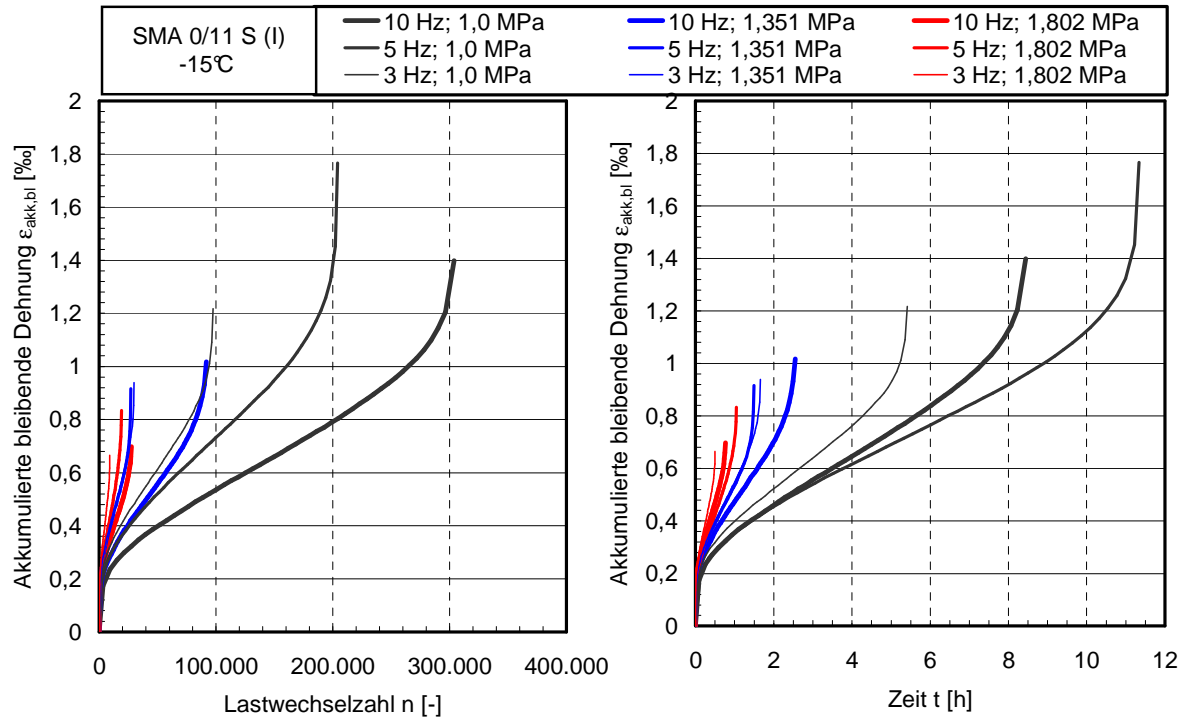


Abbildung A7-1: Verlauf der akkumulierten bleibenden Dehnung – SMA 0/11 S (I), -15 °C

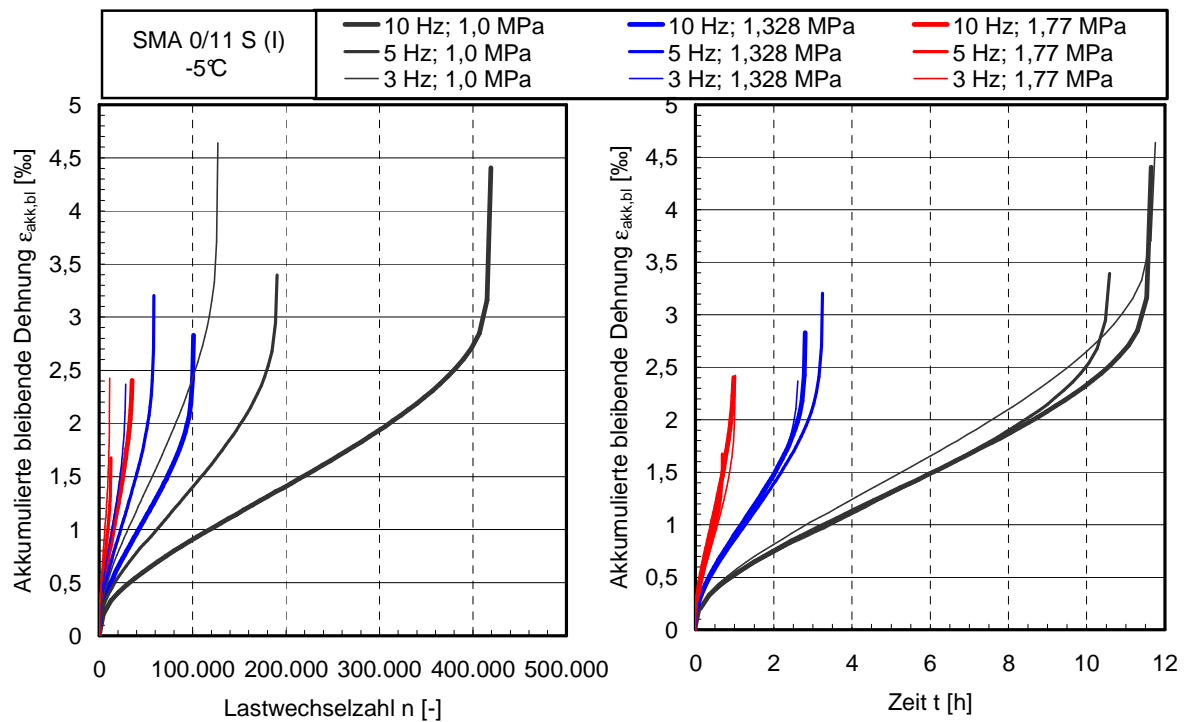


Abbildung A7-2: Verlauf der akkumulierten bleibenden Dehnung – SMA 0/11 S (I), -5 °C

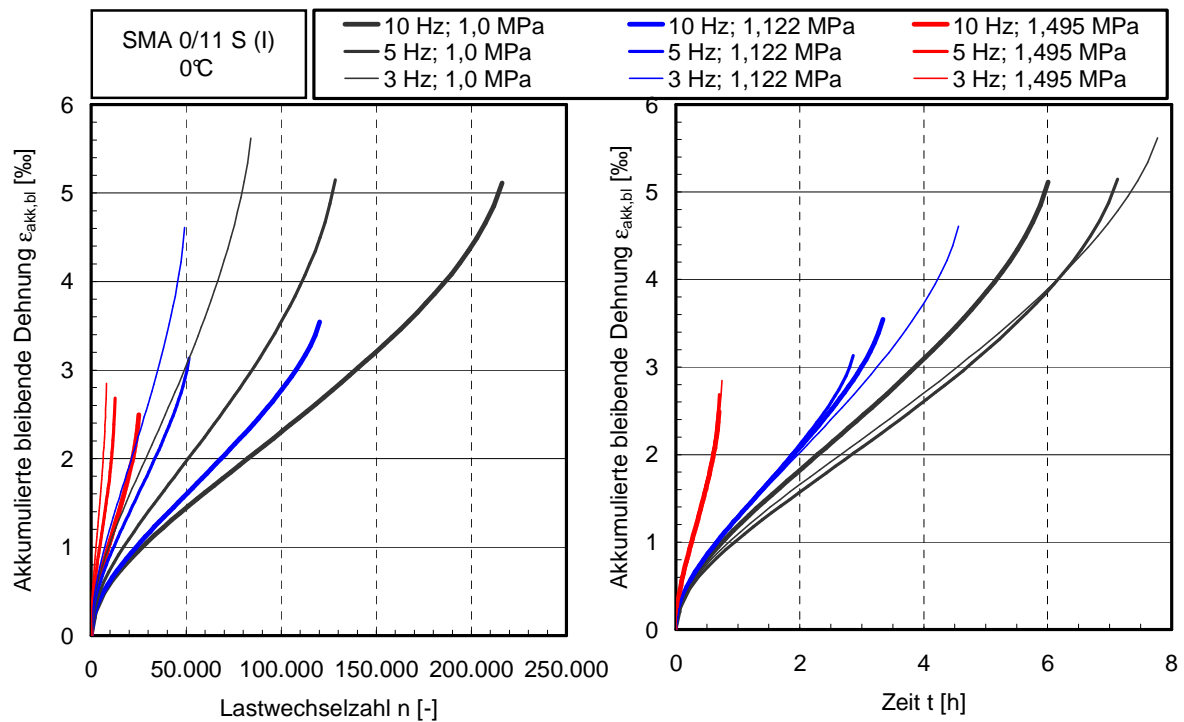


Abbildung A7-3: Verlauf der akkumulierten bleibenden Dehnung – SMA 0/11 S (I), 0 °C

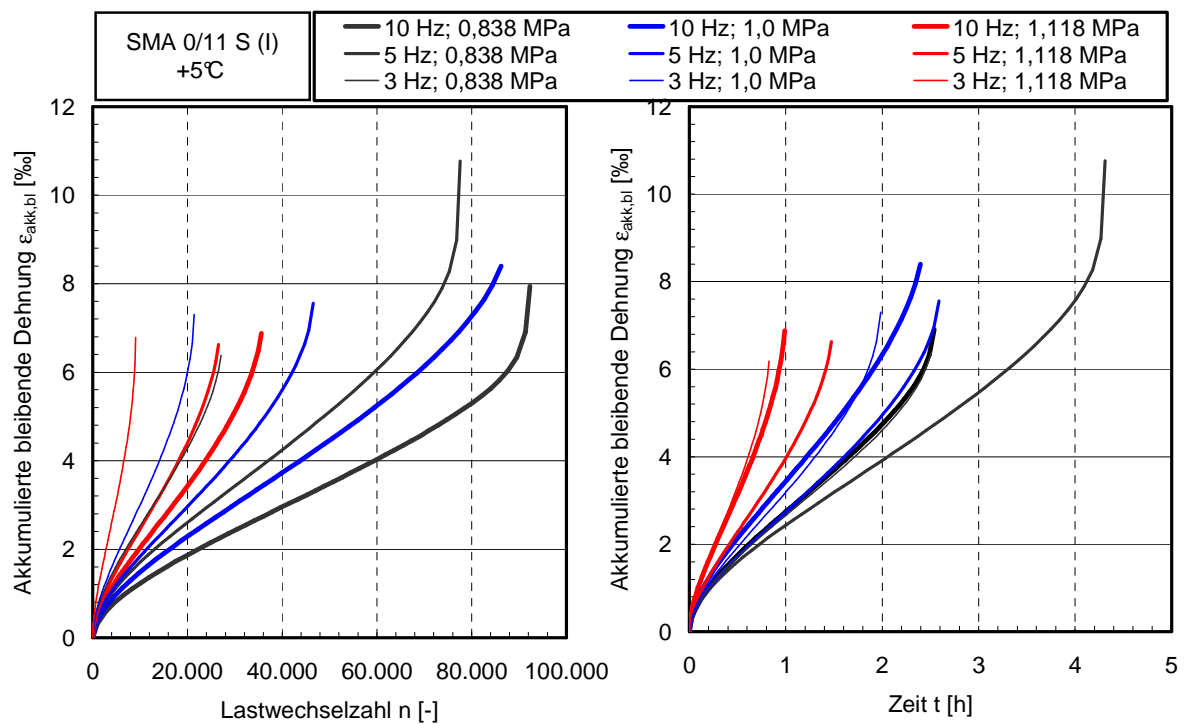


Abbildung A7-4: Verlauf der akkumulierten bleibenden Dehnung – SMA 0/11 S (I), +5 °C

A 7.2 Akkumulierte bleibende Dehnung: SMA 0/11 S (II)

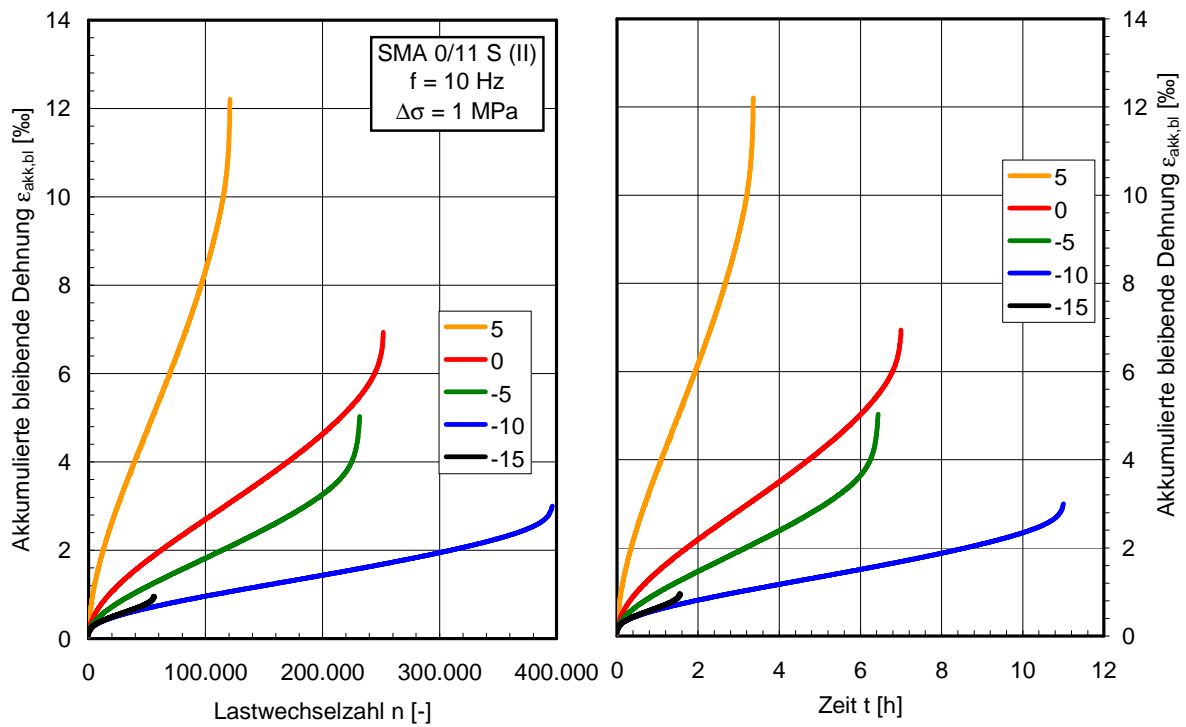


Abbildung A7-5: Gemittelte Dehnungsverläufe – SMA 0/11 S (II),

A 7.3 Akkumulierte bleibende Dehnung: AB 0/11 S

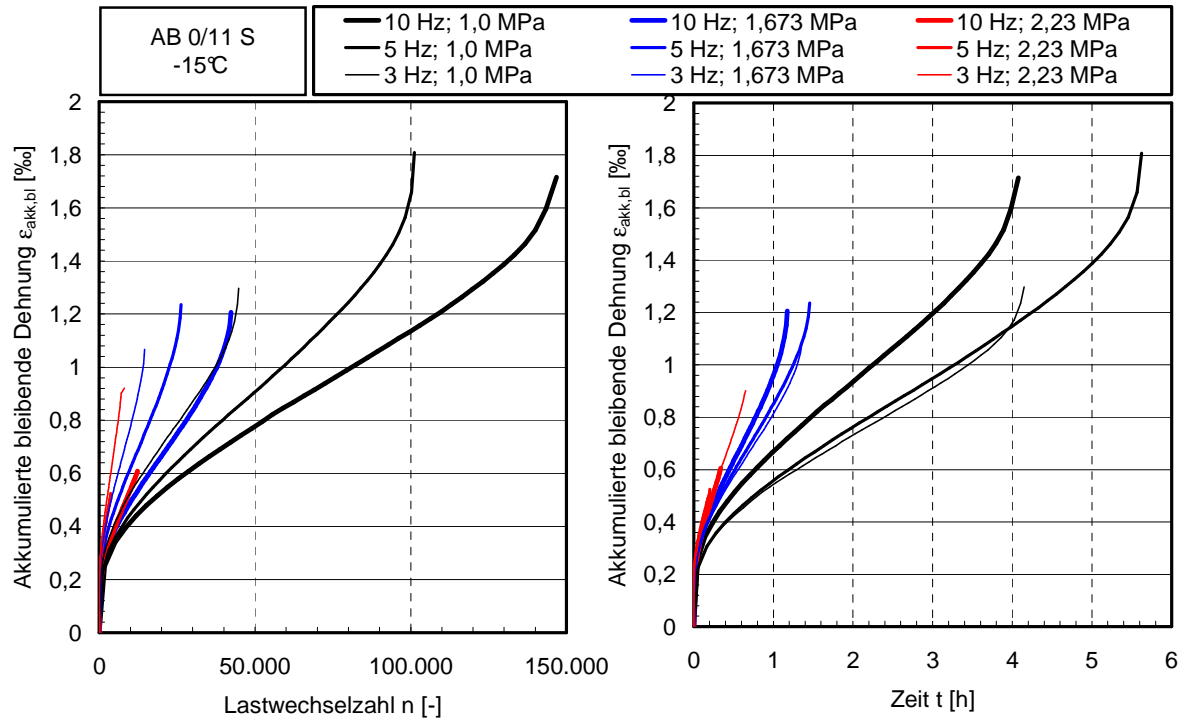


Abbildung A7-6: Gemittelte Dehnungsverläufe – AB 0/11 S, -15 °C

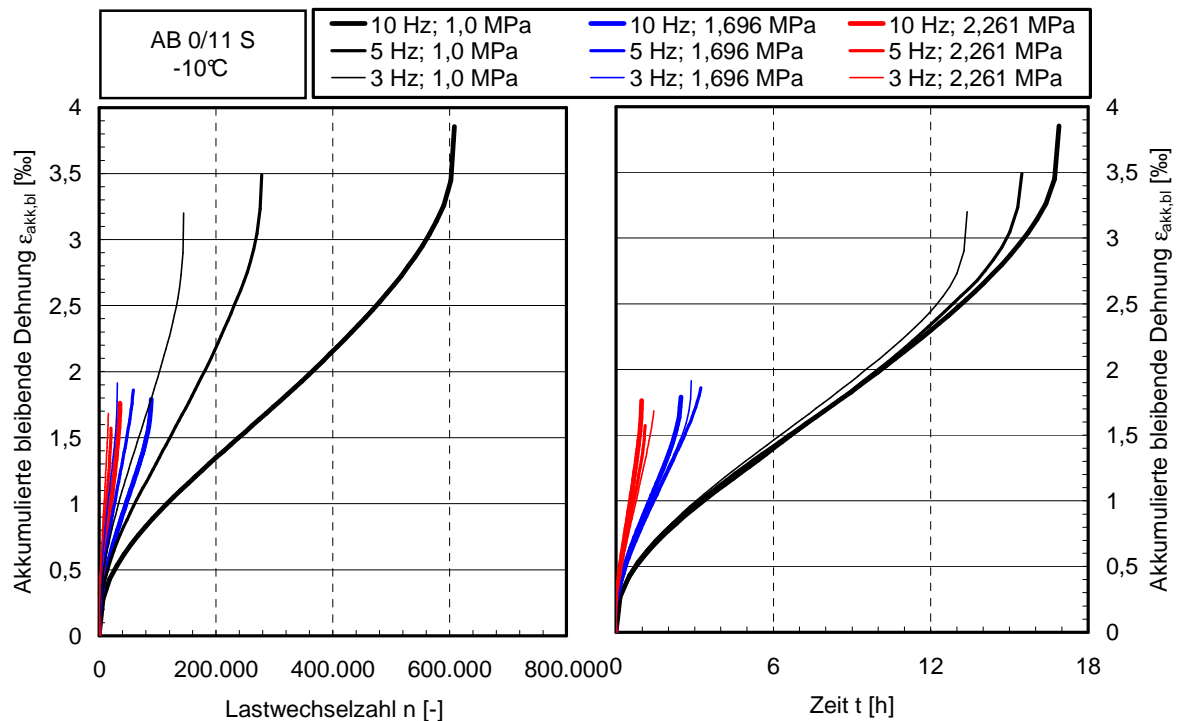


Abbildung A7-7: Gemittelte Dehnungsverläufe – AB 0/11 S, -10 °C

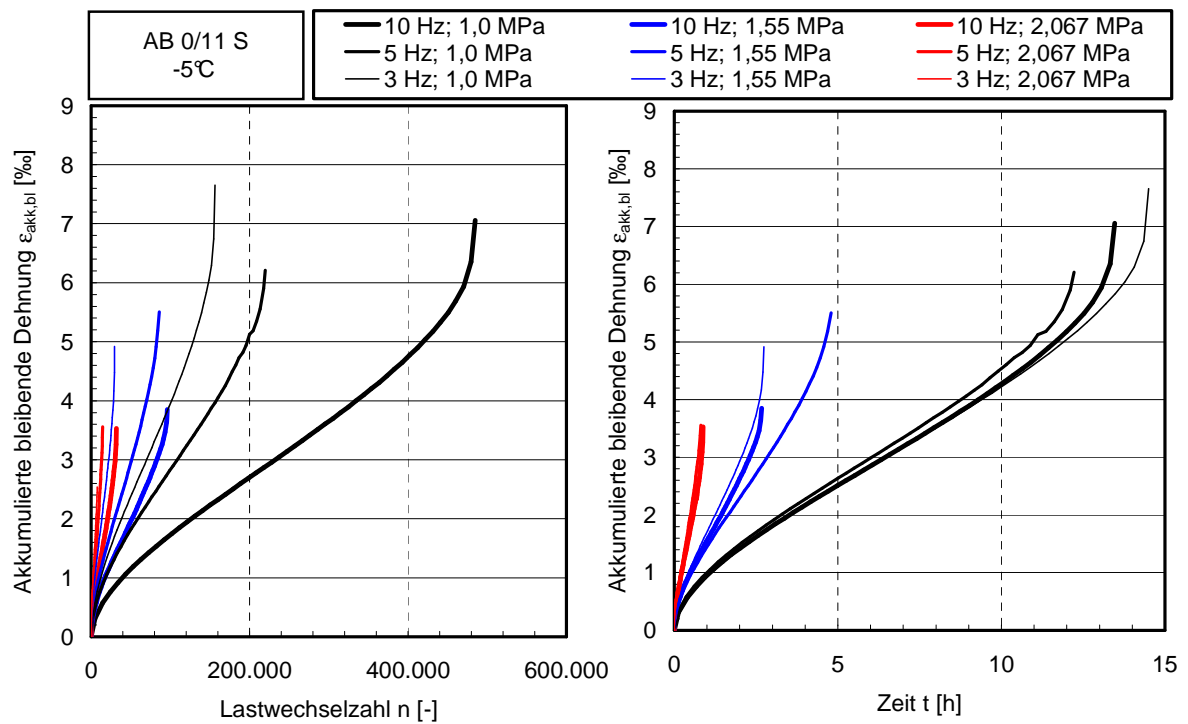


Abbildung A7-8: Gemittelte Dehnungsverläufe – AB 0/11 S, -5 °C

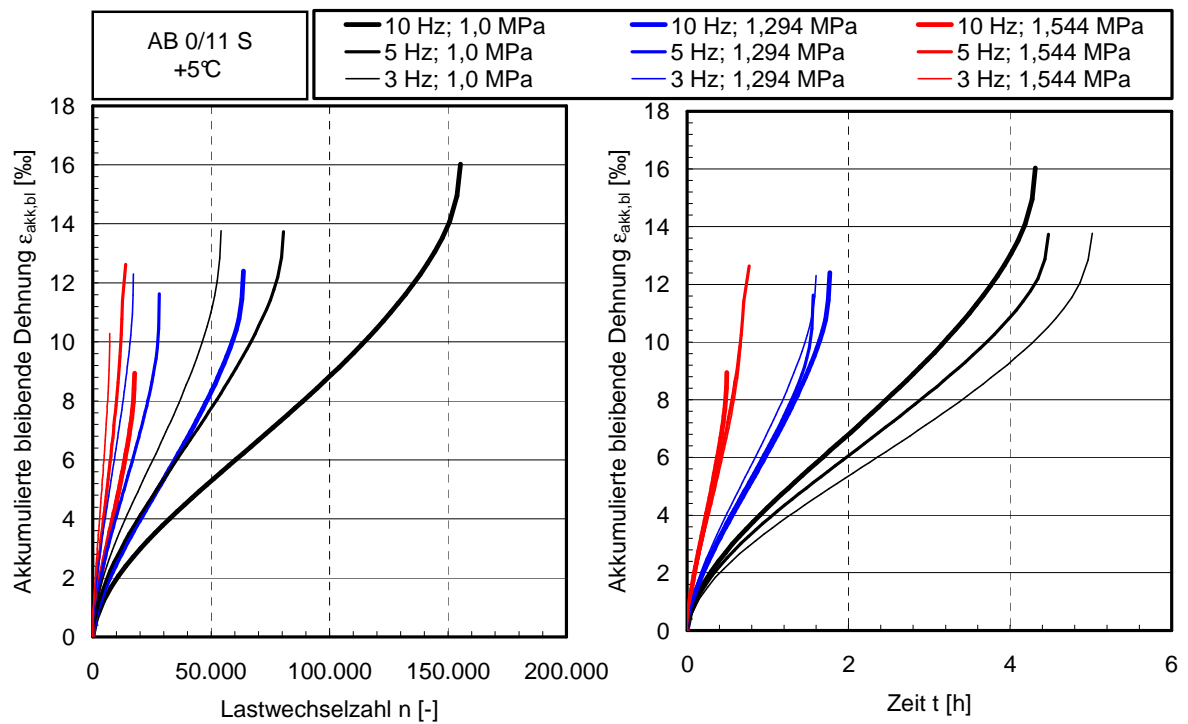


Abbildung A7-9: Gemittelte Dehnungsverläufe – AB 0/11 S, +5 °C

A 7.4 Akkumulierte bleibende Dehnung: OPA 0/8

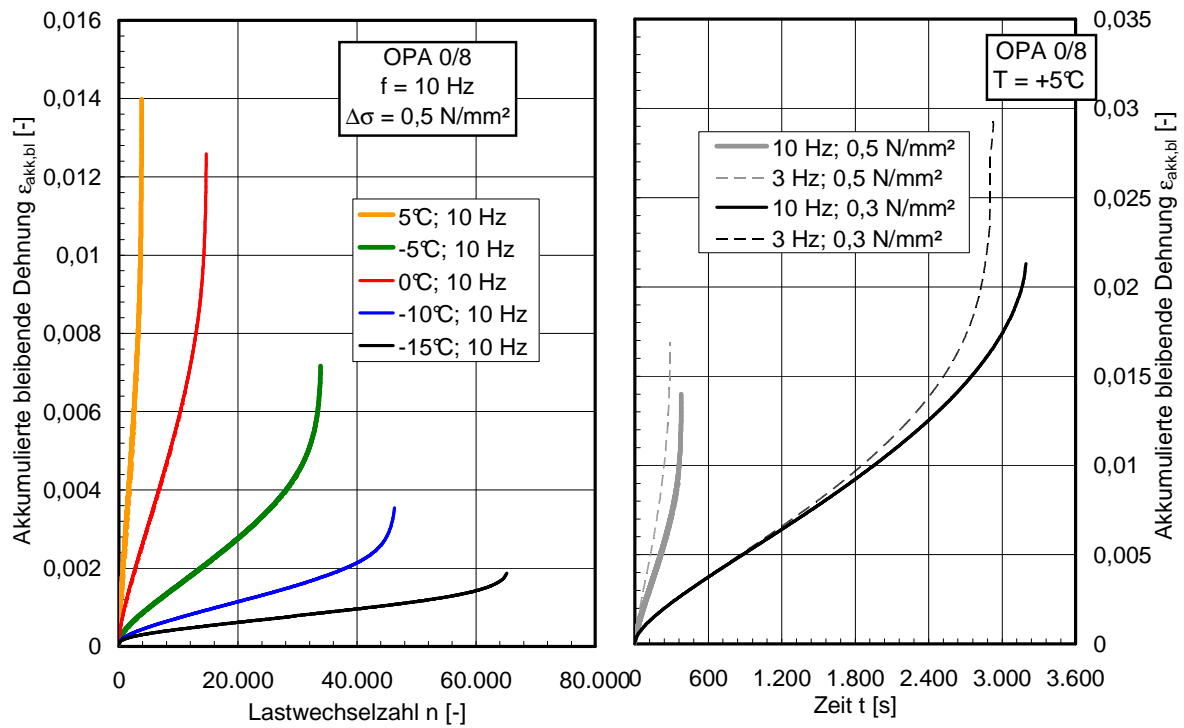


Abbildung A7-10: Gemittelte Dehnungsverläufe – OPA 0/8

A 7.5 Akkumulierte bleibende Dehnung: Abi 0/16 S

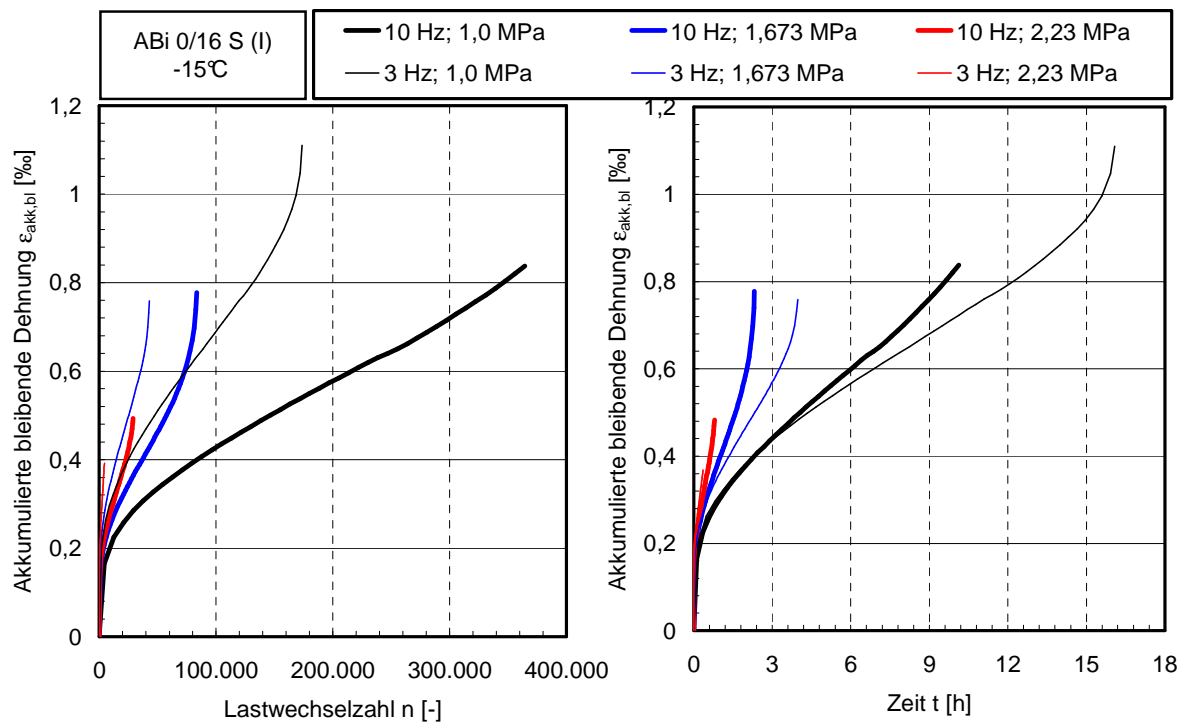


Abbildung A7-11: Gemittelte Dehnungsverläufe – ABi 0/16 S (I), -15 °C

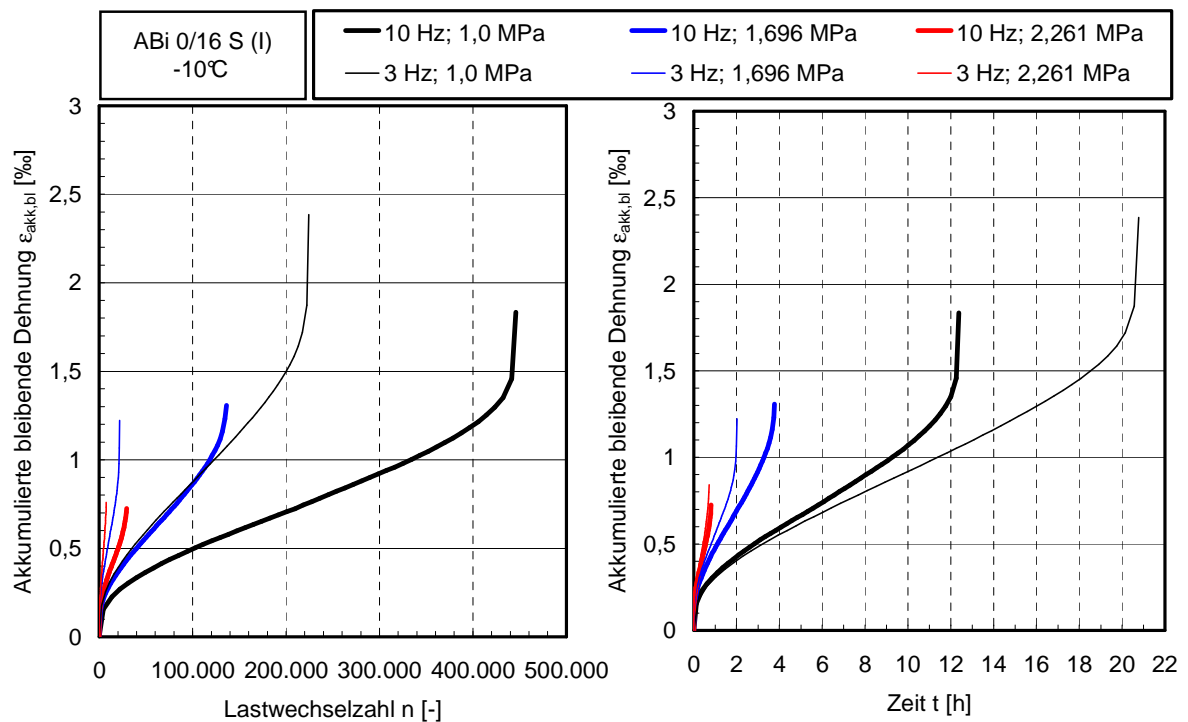


Abbildung A7-12: Gemittelte Dehnungsverläufe – ABi 0/16 S (I), -10 °C

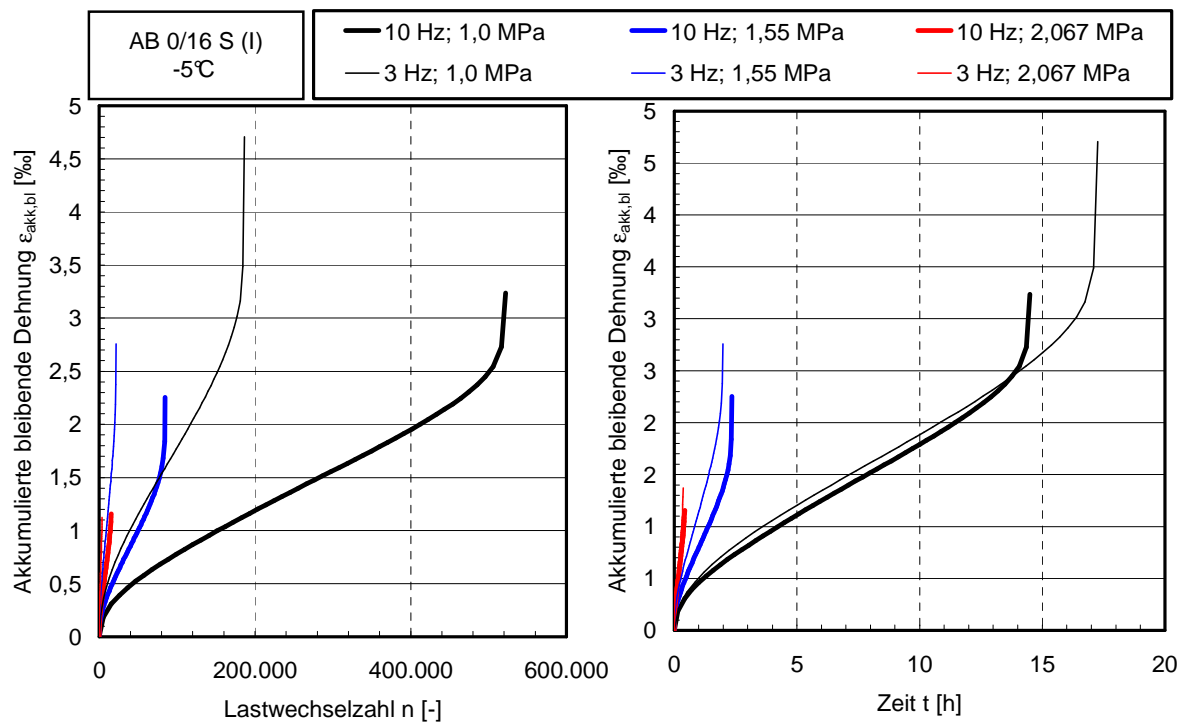


Abbildung A7-13: Gemittelte Dehnungsverläufe – ABi 0/16 S (I), -5 °C

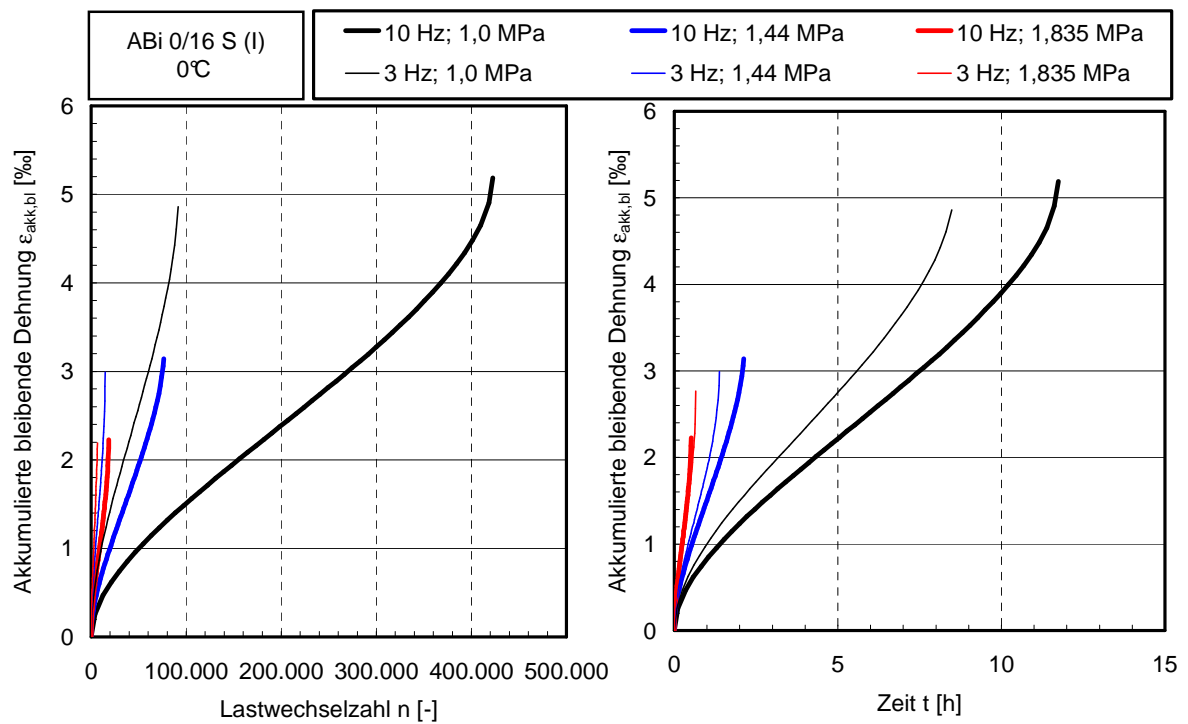


Abbildung A7-14: Gemittelte Dehnungsverläufe – ABi 0/16 S (I), 0 °C

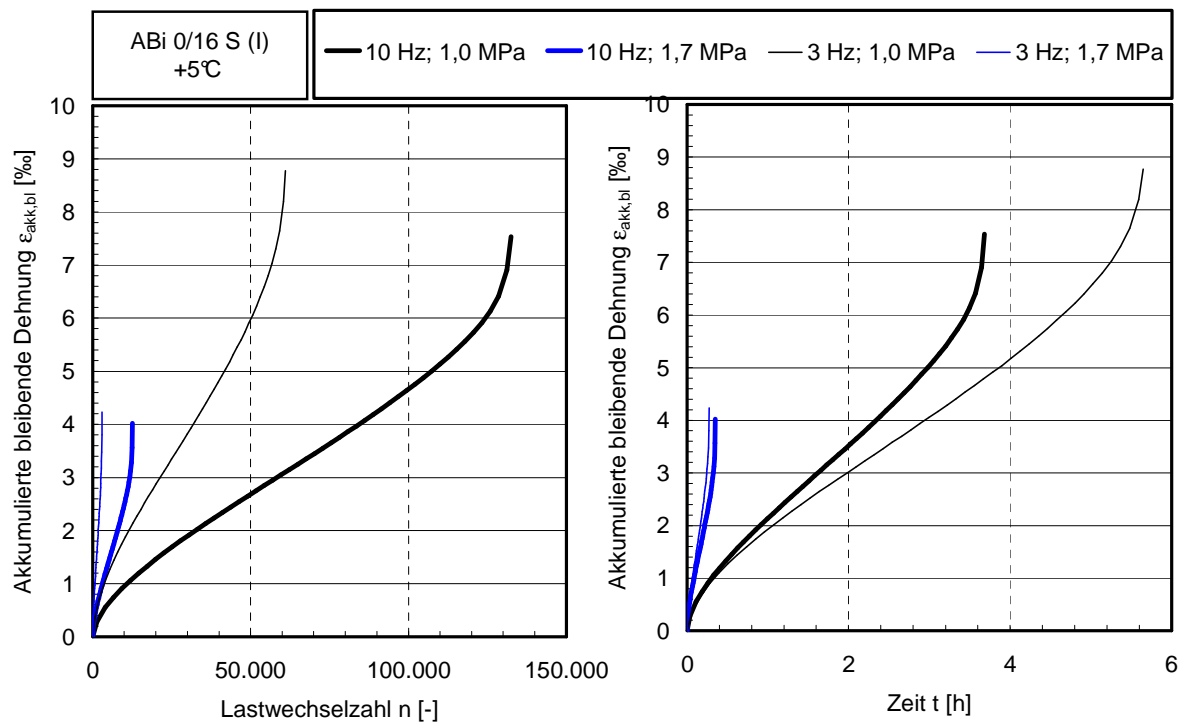


Abbildung A7-15: Gemittelte Dehnungsverläufe – ABi 0/16 S (I), +5 °C

A 7.6 Akkumulierte bleibende Dehnung: ATS 0/32 CS

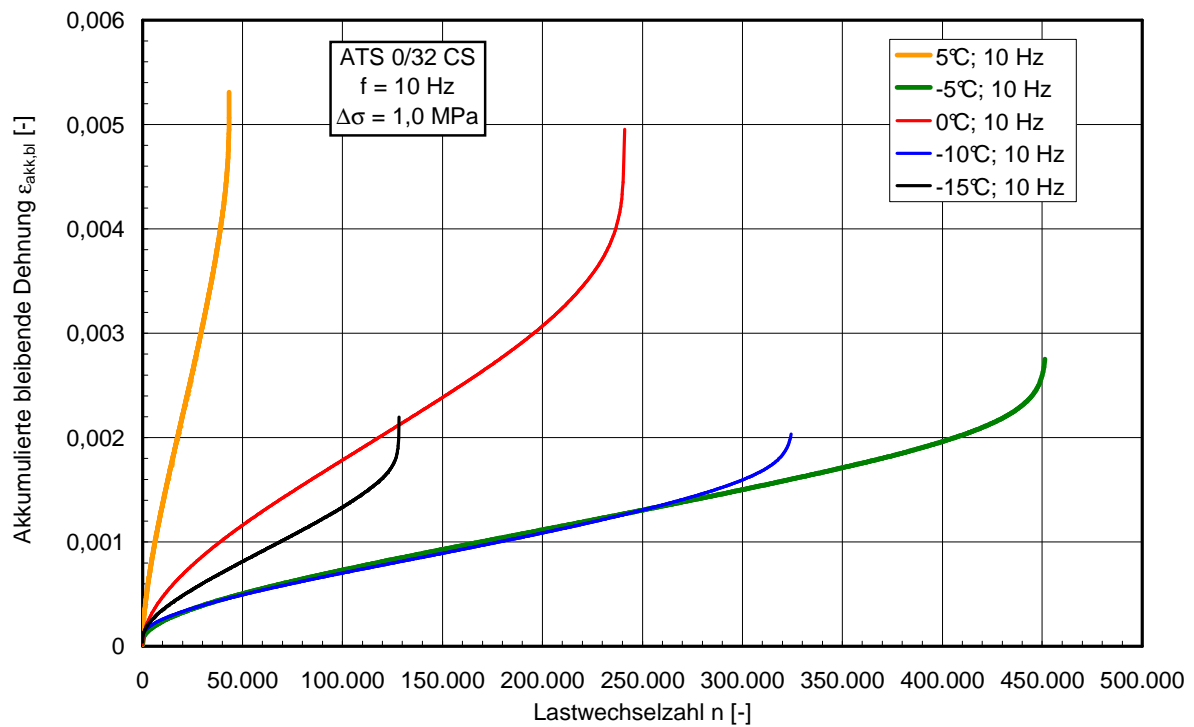


Abbildung A7-16: Gemittelte Dehnungsverläufe – ATS 0/32 CS

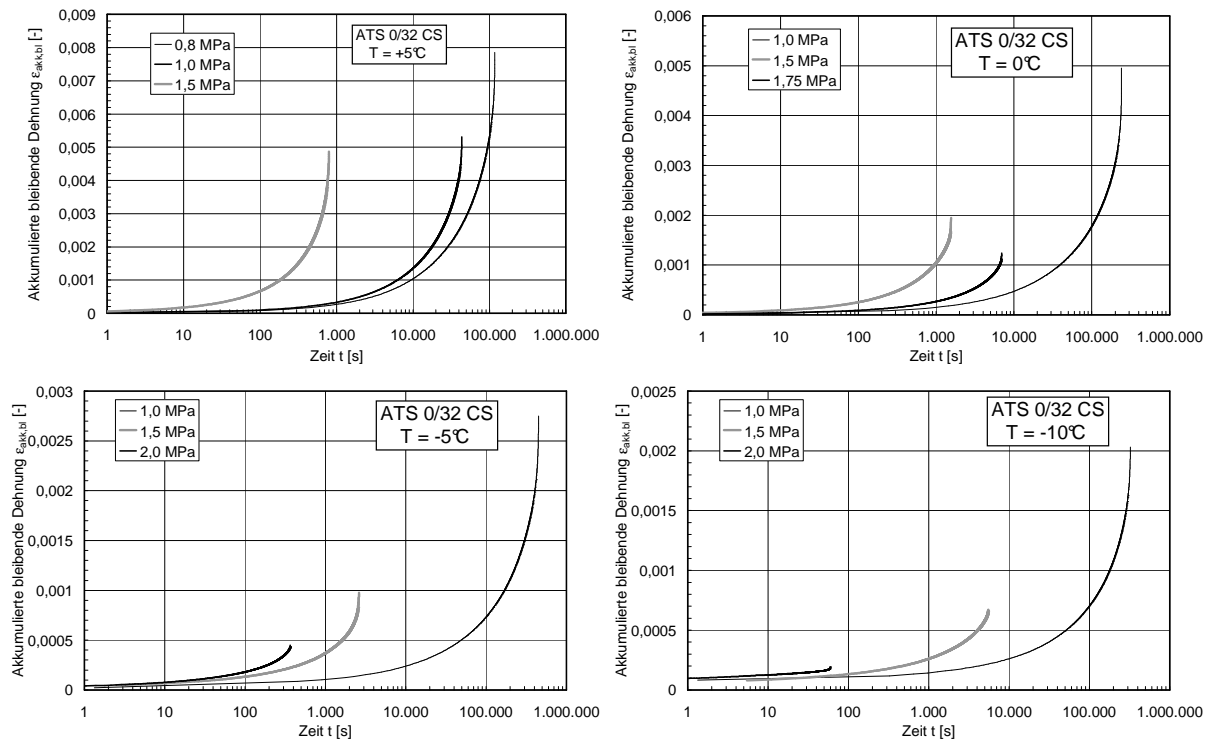


Abbildung A7-17: Dehnungsverläufe – ATS 0/32 CS

A 8 Ergebnisse der Retardationsversuche

A 8.1 Versuchsergebnisse

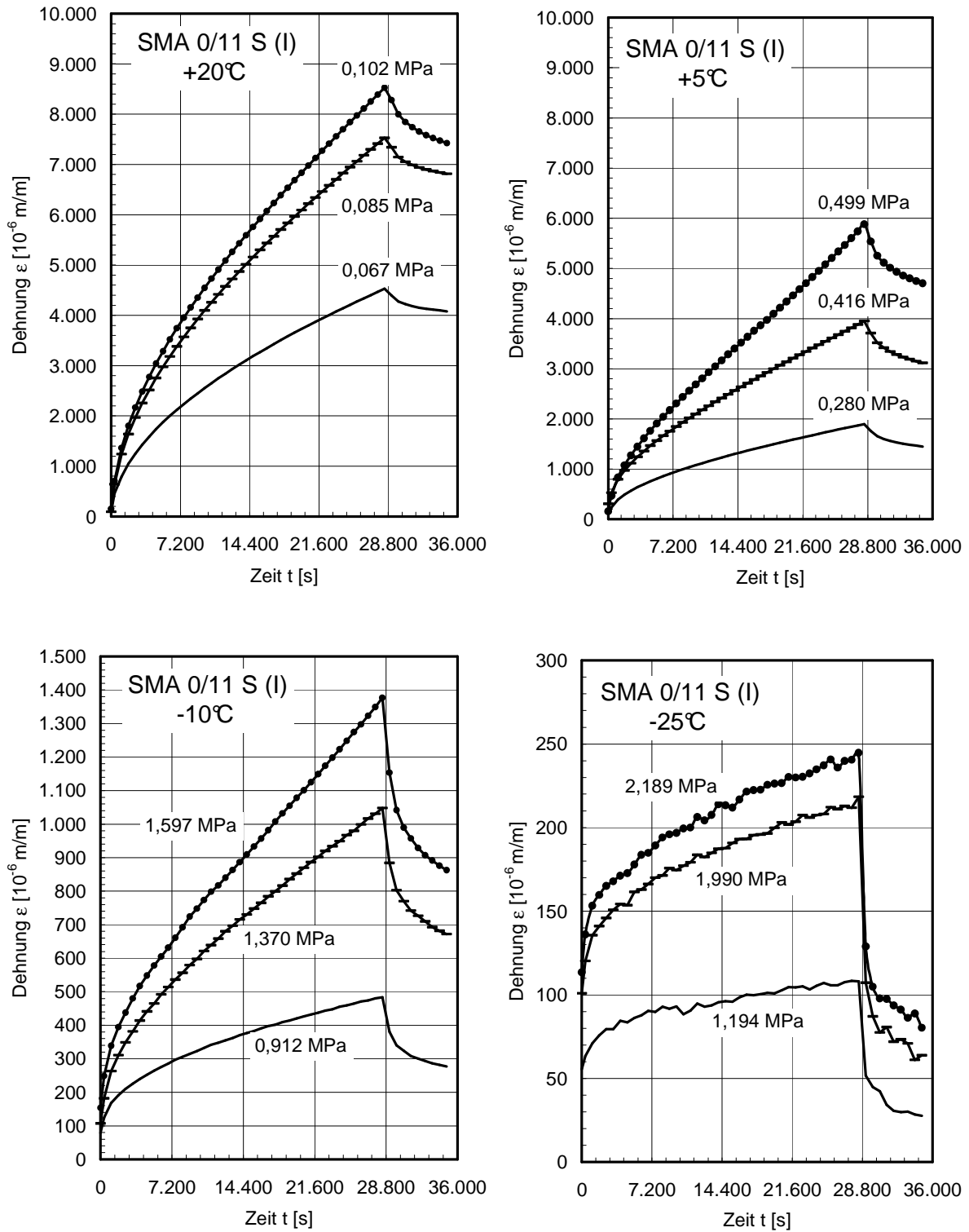


Abbildung A8-1: Gemittelte Dehnungsverläufe – SMA 0/11 S (I)

Tabelle A8-1: Ergebnisse der Retardationsversuche – SMA 0/11 S (I), -25°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
-25	1,195	1,1931	S 33-4	3,374	18.289	58.582	1.158.900.000	275.060.000	64,8%
		1,1940	S 126-1	3,374	18.652	(169.467)	2.034.756.547	273.690.533	49,0%
		1,1940	S 31-6	3,413	18.951	37.326	1.989.678.689	141.841.398	88,1%
		1,1940	S 35-4	3,413	17.122	47.577	1.401.000.000	275.060.000	85,8%
		1,1938	Mittel	3,393	18.253	47.829	1.646.083.809	241.412.983	
		0,0004	Stabw.	0,0221	801,6	10.630,2	434.564.178,5	66.384.195,4	
		0,04%	Var.-K.	0,65%	4,39%	22,23%	26,40%	27,50%	
-25	1,991	1,9887	S101-3	3,374	18.609	(117.520)	1.071.689.988	230.456.846	72,1%
		1,9889	S 35-6	3,758	20.131	46.912	809.479.999	138.069.978	97,7%
		1,9898	S 32-5	3,374	16.495	56.592	809.480.001	138.070.001	86,6%
		1,9905	S 34-5	3,566	14.089	36.082	877.629.985	117.819.005	96,4%
		1,9895	Mittel	3,518	17.331	46.529	892.069.993	156.103.958	
		0,0008	Stabw.	0,1836	2.625,7	10.260,3	123981275,8	50479492,9	
		0,04%	Var.-K.	5,22%	15,15%	22,05%	13,90%	32,34%	
-25	2,190	2,1878	S 31-5	2,607	13.212	74.753,2	791.039.991,8	213.619.993,2	93,6%
		2,1878	S102-3	3,374	21.729	98.967,2	809.479.994,8	138.069.995,5	89,0%
		2,1890	S 16-4	2,607	16.186	50.163,5	791.039.986,9	213.619.996,2	91,0%
		2,1896	S 36-3	2,569	16.035	39.709,6	896.069.971,6	124.838.100,9	96,6%
		2,1886	Mittel	2,790	16.791	65.898	821.907.486	172.537.021	
		0,0009	Stabw.	0,3902	3.565,5	26.491,4	50.200.005,0	47.745.101,9	
		0,04%	Var.-K.	13,99%	21,23%	40,20%	6,11%	27,67%	
-25	2,39	2,3503	S 36-5	2,876	20.145	41.467	807.051.711	7.597.359	96,1%
	2,387	2,3878	S 31-4	2,991	20.442	75.788	809.480.000	138.069.997	93,4%
	2,987	2,9790	S 14-5	2,864	15.908	21.061	807.015.892	71.719.196	98,2%

Tabelle A8-2: Ergebnisse der Retardationsversuche – SMA 0/11 S (I), -10°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
-10	0,914	0,9112	S 4-6	3,374	8.838	6.198	99.476.000	28.272.997	99,1%
		0,9113	S 34-6	3,374	6.523	5.971	99.212.000	24.501.997	99,6%
		0,9117	S 104-3	3,374	10.707	7.343	138.750.000	25.176.975	99,2%
		0,9125	S 33-6	3,451	6.120	5.922	138.749.999	25.176.921	99,8%
		0,9117	Mittel	3,393	8.047	6.358	119.047.000	25.782.223	
		0,0006	Stabw.	0,0383	2.139,8	667,3	22.751.319,8	1.690.724,6	
		0,06%	Var.-K.	1,13%	26,59%	10,49%	19,11%	6,56%	
-10	1,371	1,3690	S 15-4	3,259	11.131	6.224	62.326.985	21.695.883	99,8%
		1,3695	S 13-5	3,144	4.774	12.953	39.064.935	26.924.865	95,3%
		1,3703	S 11-4	2,991	6.527	6.292	54.989.001	18.472.992	99,8%
		1,3696	Mittel	3,131	7.477	8.490	52.126.974	22.364.580	
		0,0007	Stabw.	0,1347	3283,2	3865,7	11892188,3	4265431,8	
		0,05%	Var.-K.	4,30%	43,91%	45,53%	22,81%	19,07%	
		0,08%	Var.-K.	2,90%	16,53%	10,62%	23,58%	16,21%	
-10	1,599	1,5950	S 36-1	2,607	11.142	7.848	36.303.558	9.679.207	99,4%
		1,5965	S III1-5	2,607	8.638	6.653	36.304.013	9.679.262	99,9%
		1,5973	S 31-2	2,761	7.581	7.091	52.542.498	13.208.185	99,8%
		1,5981	S 82-4	2,607	9.855	8.451	56.739.179	9.956.354	99,9%
		1,5967	Mittel	2,646	9.304	7.511	45.472.311	10.630.752	
		0,0013	Stabw.	0,0767	1537,9	797,7	10724638,2	1723247,5	
		0,08%	Var.-K.	2,90%	16,53%	10,62%	23,58%	16,21%	
-10	1,827	1,8169	S 14-6	3,758	9.324,4	2.802,9	52.542.456,0	13.208.255,8	99,4%
		1,8230	S 15-1	3,374	6.644,7	2.774,4	36.303.995,7	9.679.277,8	99,3%
			Mittel	3,566	7.985	2.786	44.423.226	11.443.767	
			Stabw.	0,2711	1.894,8	20,1	11.482.325,4	2.495.364,2	
-10	1,286	1,2830	S102-4	2,991	8.785	9.803	81.268.323	21.553.650	99,2%
	2,284	2,2646	S 11-5	3,531	8.231	2.667	53.985.244	6.030.174	99,5%

Tabelle A8-3: Ergebnisse der Retardationsversuche – SMA 0/11 S (I), +5°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
+5	0,28	0,2753	s77-2	2,991	1.394,1	519,8	6.331.300,0	2.555.699,7	99,9%
		0,2760	s81-5	2,991	968,2	463,4	7.101.000,0	2.101.399,5	99,9%
		0,2765	s80-1	2,991	1.224,2	509,5	7.101.000,0	2.101.399,6	99,9%
		0,2777	s79-1	3,067	1.676,1	521,3	7.256.500,0	2.452.899,6	99,9%
		0,2764	Mittel	3,010	1.316	503	6.947.450	2.302.850	
		0,0010	Stabw.	0,0383	297,3	27,2	417256,1	236370,1	
		0,37%	Var.-K.	1,27%	22,60%	5,40%	6,01%	10,26%	
+5	0,419	0,4146	s14-3	3,758	1.278,1	622,3	3.607.400,6	2.066.698,7	100,0%
		0,4156	s105-2	3,374	1.490,4	554,1	5.957.933,9	1.753.022,6	99,9%
		0,4168	s13-6	3,259	543,6	476,5	3.984.000,0	1.755.297,0	100,0%
		0,4157	Mittel	3,464	1.104	551	4.516.445	1.858.339	
		0,0011	Stabw.	0,2610	496,8	73,0	1262487,5	180448,0	
		0,26%	Var.-K.	7,54%	45,00%	13,25%	27,95%	9,71%	
+5	0,503	0,4984	s36-6	2,991	1.655,9	656,0	3.277.998,0	1.493.599,5	100,0%
		0,4995	s82-5	2,607	1.017,8	648,6	3.478.213,9	1.484.750,2	99,9%
		0,5001	s31-1	2,722	2.733,6	714,3	2.446.908,4	1.064.891,0	100,0%
		0,4993	Mittel	2,774	1.802	673	3.067.707	1.347.747	
		0,0009	Stabw.	0,1968	867,2	36,0	546867,9	245000,4	
		0,17%	Var.-K.	7,09%	48,12%	5,35%	17,83%	18,18%	
+5	0,59	0,5550	S31-3		1.457,9	740,0	2.446.909,6	1.064.885,0	99,9%
	0,615	0,5970	S12-5		832,6	80,3	2.013.949,9	1.015.505,8	99,2%

Tabelle A8-4: Ergebnisse der Retardationsversuche – SMA 0/11 S (I), +20°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
+20	0,071	0,0658	S 77-4	2,991	149	39	723.240	209.500	99,9%
		0,0665	S103-2	2,991	160	60	857.210	277.340	99,9%
		0,0671	S 82-6	2,991	201	51	857.210	277.340	99,9%
		0,0684	S 78-4	2,837	200	35	543.680	173.950	99,9%
		0,0670	Mittel	2,9525	177	46	745.335	234.532	
		0,0011	Stabw.	0,0767	26,8	11,3	148.531,7	51.516,4	
		1,64%	Var.-K.	2,60%	15,11%	24,45%	19,93%	21,97%	
+20	0,089	0,0857	S 32-3	3,363	167	38	575.100	186.580	99,9%
		0,0836	S 79-2	3,374	137	34	495.102	176.682	100,0%
		0,0849	S 105-1	3,374	106	28	541.267	248.801	99,9%
		0,0850	S 77-6	3,374	144	39	564.760	181.670	99,9%
		0,0857	S 32-1	2,991	147	40	409.327	154.423	100,0%
		0,0850	Mittel	3,2952	140	36	517111	189631	
		0,0009	Stabw.	0,170	22,0	5,1	67.672,7	35.288,4	
+20	0,107	1,00%	Var.-K.	5,17%	15,67%	14,19%	13,09%	18,61%	
		0,1014	S 81-1	2,991	161	37	462.628	180.751	100,0%
		0,1023	S 104-4	2,991	186	58	823.587	262.293	99,9%
		0,1027	S 78-1	2,991	154	39	466.885	183.412	100,0%
		0,1036	S 79-3	3,106	269	48	612.670	213.380	99,9%
		0,1025	Mittel	3,0196	192	45	591.442	209.959	
		0,0009	Stabw.	0,0575	52,8	9,5	169.754,1	37.896,3	
+20		0,89%	Var.-K.	1,90%	27,43%	20,96%	28,70%	18,05%	

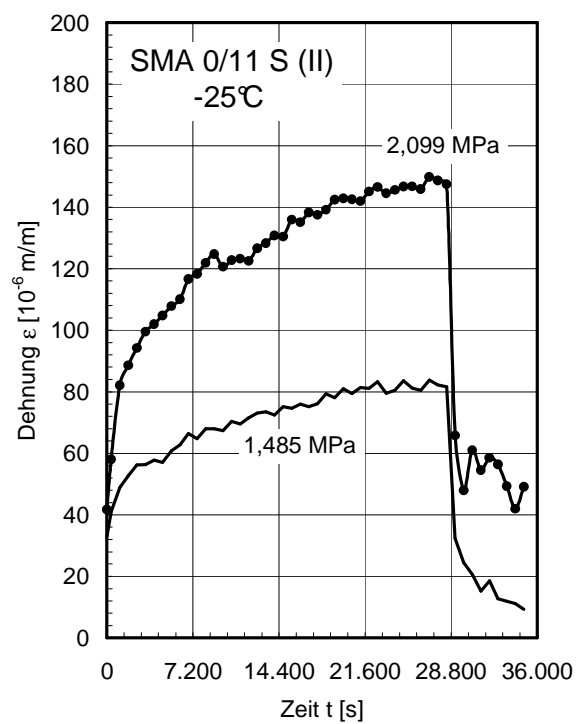
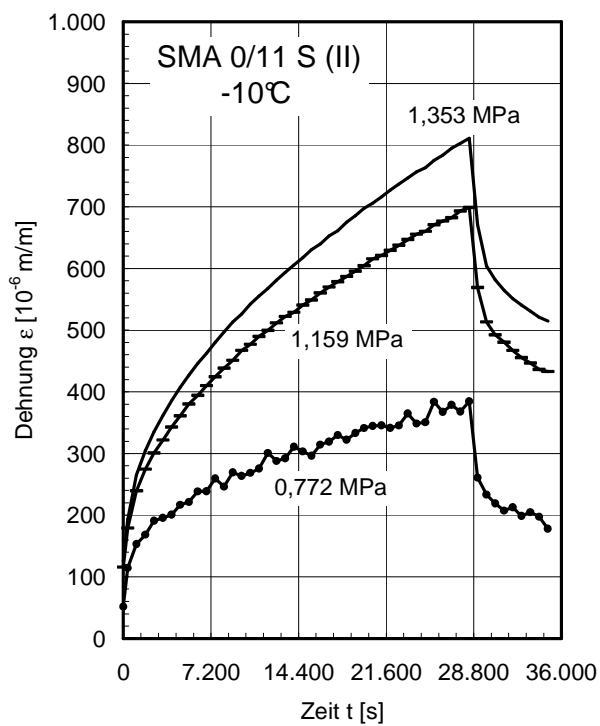
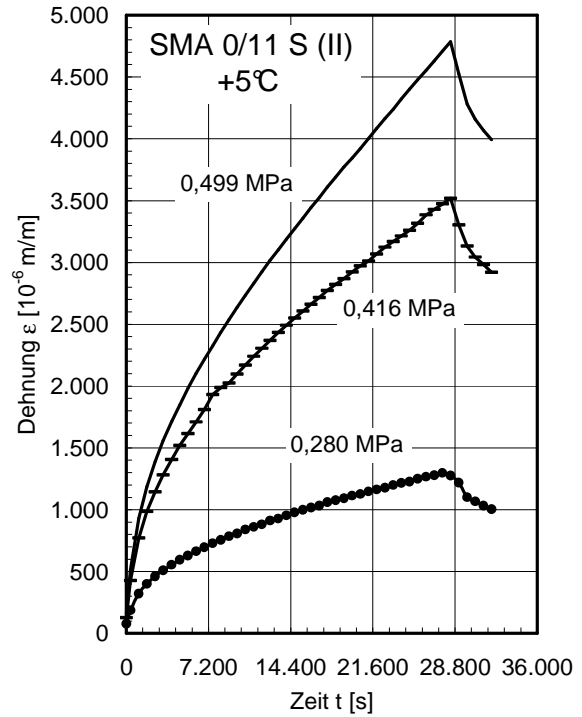
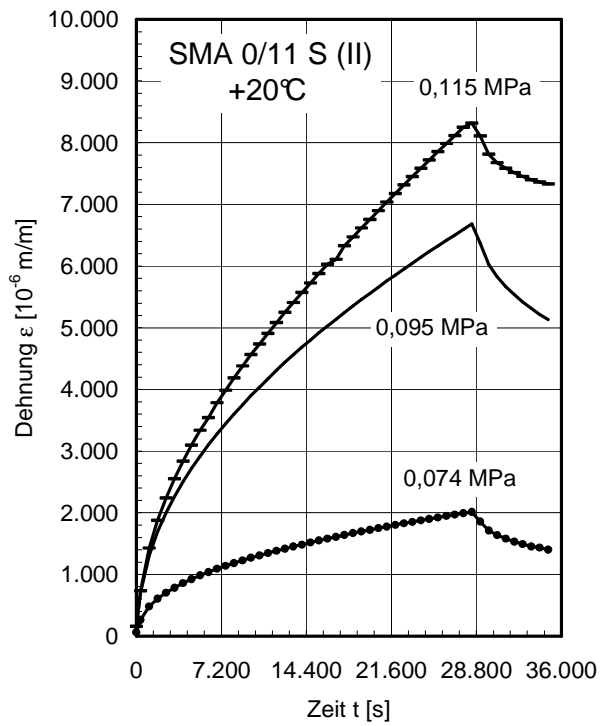


Abbildung A8-2: Gemittelte Dehnungsverläufe – SMA 0/11 S(II)

Tabelle A8-5: Ergebnisse der Retardationsversuche – SMA 0/11 S (II), -25°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V_m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E_1	E_2	λ_1	λ_2	β
-25	1,486	1,486	M 7-1	3,170	29.145	79.435	1.830.600.000	396.250.000	85,00%
		1,485	M 28-3	2,635	40.506	45.482	1.552.300.000	119.670.000	70,80%
		1,484	M 20-6	2,182	53.894	80.066	1.730.500.000	394.970.002	61,46%
		1,485	Mittel	2,662	41.181	68.328	1.704.466.667	303.630.001	
		0,0010	Stabw.	0,4946	12.388,4	19.787,3	140.964.617,3	159.315.319,3	
		0,07%	Var.-K.	18,58%	30,08%	28,96%	8,27%	52,47%	
-25	1,847	1,856	M 7-4	3,088	(18.740)	(59.335)	(1.382.000.000)	(163.649.489)	13,73%
		1,856	m24-1	2,635	12.463	47.378	1.573.500.000	163.649.486	81,56%
		1,856	M 20-4	2,223	(11.724)	(33.651)	(450.030.000)	(18.339.000)	15,50%
		1,856	Mittel	2,649	14.309	46.788	1.135.176.667	115.212.658	
		0,0000	Stabw.	0,4324	3.854,7	12.852,4	601.030.389,3	83.895.049,2	
		0,00%	Var.-K.	16,33%	26,94%	27,47%	52,95%	72,82%	
-25	2,100	2,099	M 8-6	2,594	40.231	57.754	1.189.200.000	128.919.997	85,69%
		2,099	M 29-3	2,429	28.273	49.866	1.859.200.000	128.920.000	85,73%
		2,099	Mittel	2,512	34.252	53.810	1.524.200.000	128.919.999	
		0,0	Stabw.	0,1167	8.455,6	5.577,7	473.761.543,4	2,1	
		0,00%	Var.-K.	4,65%	24,69%	10,37%	31,08%	0,00%	
-25	1,114	1,114	M 6-2	2,305	24.863	98.400	2.397.000.000	145.156.747	56,90%
	2,300	2,299	M 42-3	2,841	18.258	45.855	1.305.500.000	119.319.877	90,27%

Tabelle A8-6: Ergebnisse der Retardationsversuche – SMA 0/11 S (II), -10°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V_m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E_1	E_2	λ_1	λ_2	β
-10	0,774	0,771	M 25-2	2,635	7.574	8.899	153.744.384	21.088.421	98,09%
		0,772	M 7-3	2,758	(1.542)	5.329	120.459.999	18.511.979	83,05%
		0,772	M 26-5	2,470	8.124	7.875	118.980.000	23.133.000	76,89%
		0,772	Mittel	2,621	7.849	7.368	131.061.461	20.911.133	
		0,0006	Stabw.	0,1446	388,9	1.838,3	19.657.920,7	2.315.606,2	
		0,07%	Var.-K.	5,52%	4,95%	24,95%	15,00%	11,07%	
-10	1,161	1,158	M43-3	2,429	5.499	6.517	143.570.000	28.625.000	99,21%
		1,158	M 26-6	2,758	5.812	5.812	97.976.000	23.192.995	99,40%
		1,159	M 24-4	2,264	9.009	5.666	90.083.000	(11.206.000)	21,10%
		1,160	M 29-1	2,882	10.202	5.199	77.787.410	21.467.077	99,82%
		1,159	Mittel	2,583	7.631	5.799	102.354.103	24.428.357	
		0,0010	Stabw.	0,2861	2.335,5	545,7	28.705.518,2	3.735.445,8	
-10	1,355	0,08%	Var.-K.	11,07%	30,61%	9,41%	28,05%	15,29%	
		1,352	M 28-4	2,676	6.483	6.025	87.648.000	24.329.995	99,68%
		1,353	M 25-6	2,964	8.138	5.997	93.056.000	22.261.000	99,80%
		1,354	M 8-2	2,429	7.378	6.373	100.460.000	23.571.000	99,76%
		1,353	Mittel	2,690	7.333	6.132	93.721.333	23.387.332	
		0,0010	Stabw.	0,2679	828,4	209,5	6.431.861,1	1.046.654,5	
-10	1,653	0,07%	Var.-K.	9,96%	11,30%	3,42%	6,86%	4,48%	
		1,651	M 48-4	2,429	7.026	7.600	98.638.000	25.680.000	99,55%

Tabelle A8-7: Ergebnisse der Retardationsversuche – SMA 0/11 S (II), +5°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
+5	0,276	0,272	M 41-2	2,841	1.425	610	10.918.000	2.357.600	99,79%
		0,272	M 26-3	2,758	1.663	575	9.919.300	2.050.000	95,23%
		0,272	M 25-4	2,429	1.473	620	10.330.000	2.374.400	99,81%
		0,273	M 20-5	2,141	1.584	730	12.947.000	2.858.600	97,31%
		0,272	Mittel	2,542	1.536	634	11.028.575	2.410.150	
		0,0005	Stabw.	0,3213	107,3	66,9	1.343.016,4	334.093,3	
		0,18%	Var.-K.	12,64%	6,99%	10,57%	12,18%	13,86%	
+5	0,414	0,411	M 27-3	2,800	1.362	529	8.600.000	2.000.100	99,88%
		0,411	M 25-3	2,635	1.254	369	5.604.000	1.336.400	99,71%
		0,411	M 28-2	2,429	901	270	4.429.400	852.250	99,44%
		0,411	Mittel	2,621	1.172	389	6.211.133	1.396.250	
		0,0000	Stabw.	0,1856	241,2	131,0	2.150.566,0	576.260,7	
		0,00%	Var.-K.	7,08%	20,57%	33,65%	34,62%	41,27%	
+5	0,496	0,494	M 6-1	3,252	900	396	4.697.800	1.199.000	99,93%
		0,493	M 6-5	2,635	1.052	388	3.212.500	1.127.200	99,97%
		0,493	M 24-5	2,223	1.753	471	6.451.200	1.623.300	99,69%
		0,493	Mittel	2,703	1.403	429	4.831.850	1.375.250	
		0,0006	Stabw.	0,5180	496,1	58,5	2.290.106,7	350.795,7	
		0,12%	Var.-K.	19,16%	35,37%	13,63%	47,40%	25,51%	
+5	0,599	0,595	M 52-5	2,841	1.479	601	4.599.500	1.536.000	99,98%
		0,596	M 47-3	2,429	1.629	722	7.719.500	2.208.000	99,77%
		0,595	Mittel	2,635	1.554	662	6.159.500	1.872.000	
		0,0009	Stabw.	0,2911	106,7	85,4	2.206.173,1	475.175,7	
		0,15%	Var.-K.	11,05%	6,87%	12,90%	35,82%	25,38%	

Tabelle A8-8: Ergebnisse der Retardationsversuche – SMA 0/11 S (II), +20°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
+20	0,079	0,076	M 7-2	3,047	239	106	2.147.600	415.150	99,81%
		0,073	M 8-3	2,429	301	63	1.321.900	153.880	99,64%
		0,074	M 26-2	2,429	136	52	810.231	261.701	99,86%
		0,074	M 24-3	2,017	302	94	2.144.100	413.190	99,80%
		0,074	Mittel	2,480	245	79	1.605.958	310.980	
		0,0013	Stabw.	0,4244	77,8	25,3	657.480,9	127.026,4	
		1,69%	Var.-K.	17,11%	31,83%	32,26%	40,94%	40,85%	
+20	0,099	0,095	M 25-1	2,882	108	37	606.310	155.570	99,81%
		0,095	M 29-2	2,594	120	38	582.720	173.390	99,95%
		0,096	M 27-4	2,429	181	71	1.267.900	290.830	99,90%
		0,095	Mittel	2,635	136	49	818.977	206.597	
		0,0006	Stabw.	0,2292	39,0	19,4	388.957,9	73.490,3	
		0,61%	Var.-K.	8,70%	28,58%	39,96%	47,49%	35,57%	
+20	0,119	0,115	M 7-5	3,211	136	48	427.280	158.180	99,97%
		0,115	M 27-2	2,552	138	48	678.440	199.570	99,94%
		0,115	M 24-6	2,347	195	61	891.200	250.600	99,93%
		0,115	Mittel	2,703	156	53	665.640	202.783	
		0,0000	Stabw.	0,4516	33,8	7,5	232.224,7	46.293,7	
		0,00%	Var.-K.	16,71%	21,61%	14,29%	34,89%	22,83%	

Tabelle A8-9: Ergebnisse der Retardationsversuche – SMA 0/11 S (II), 0°C, -5°C, -15°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V_m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E_1	E_2	λ_1	λ_2	β
-15	2,406	2,404	M 47-6	2,676	10.457	14.583	192.350.000	44.764.000	99,27%
		2,403	M 52-2	3,005	12.797	12.625	155.090.000	40.879.000	99,33%
		2,404	Mittel	2,841	11.627	13.604	173.720.000	42.821.500	
		0,0008	Stabw.	0,2329	1.654,3	1.384,7	26.346.798,7	2.747.109,9	
		0,04%	Var.-K.	8,20%	14,23%	10,18%	15,17%	6,42%	
-5	1,126	1,123	M 47-1	2,552	3.569	3.215	40.547.000	14.403.000	99,79%
		1,123	M 47-4	2,347	4.239	3.224	40.547.000	14.403.000	99,13%
		1,123	M 52-6	2,841	5.300	2.885	27.457.000	10.000.000	99,91%
		1,123	Mittel	2,580	4.369	3.108	36.183.667	12.935.333	
		0,0004	Stabw.	0,2482	873,0	193,1	7.557.515,0	2.542.073,2	
0	0,788	0,04%	Var.-K.	9,62%	19,98%	6,21%	20,89%	19,65%	
		0,785	M 52-4	2,841	2.597	1.271	12.535.000	4.333.600	99,92%
		0,784	M 47-2	2,552	2.892	1.553	18.093.000	6.464.700	99,77%
		0,785	M 48-3	2,347	3.003	1.477	18.093.000	6.464.700	99,85%
		0,785	Mittel	2,580	2.831	1.434	16.240.333	5.754.333	
		0,0007	Stabw.	0,2482	210,1	145,7	3.208.912,8	1.230.391,2	
		0,09%	Var.-K.	9,62%	7,42%	10,16%	19,76%	21,38%	

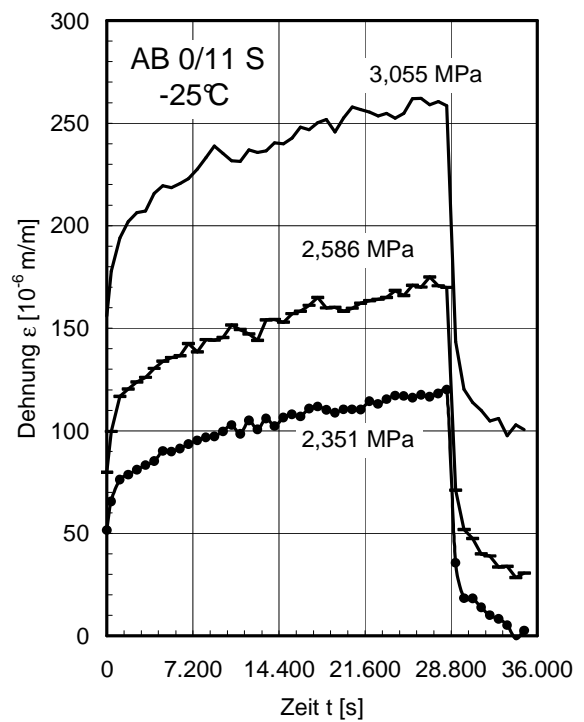
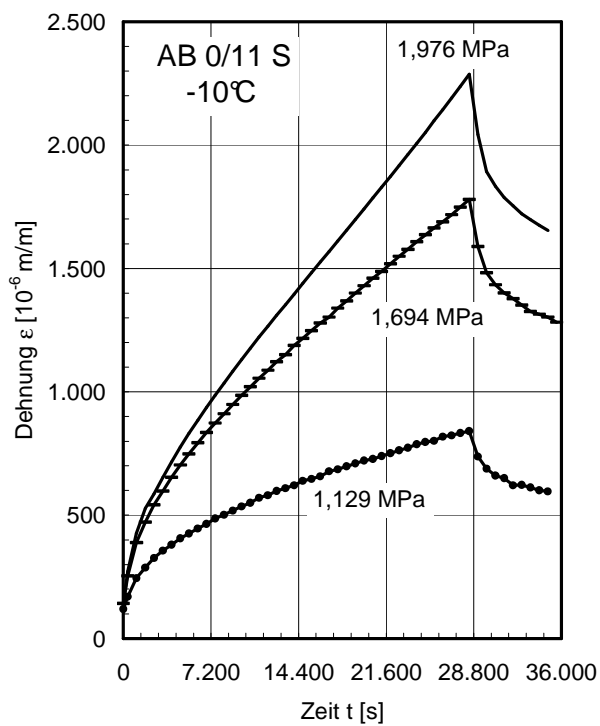
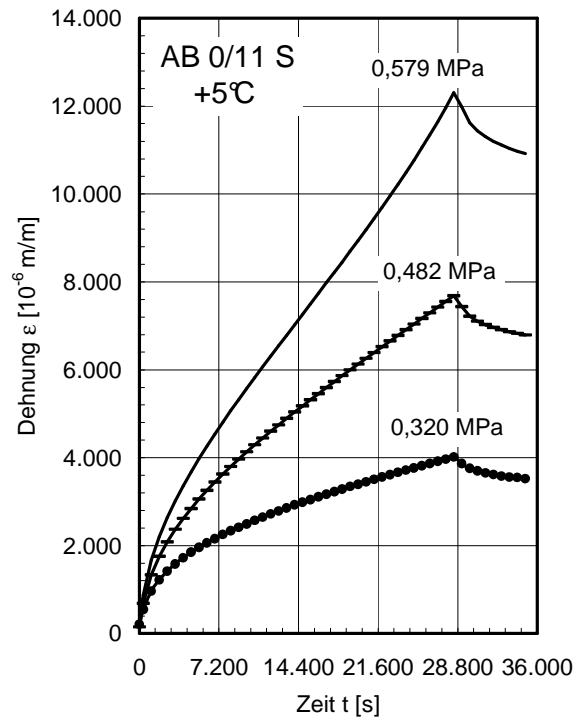
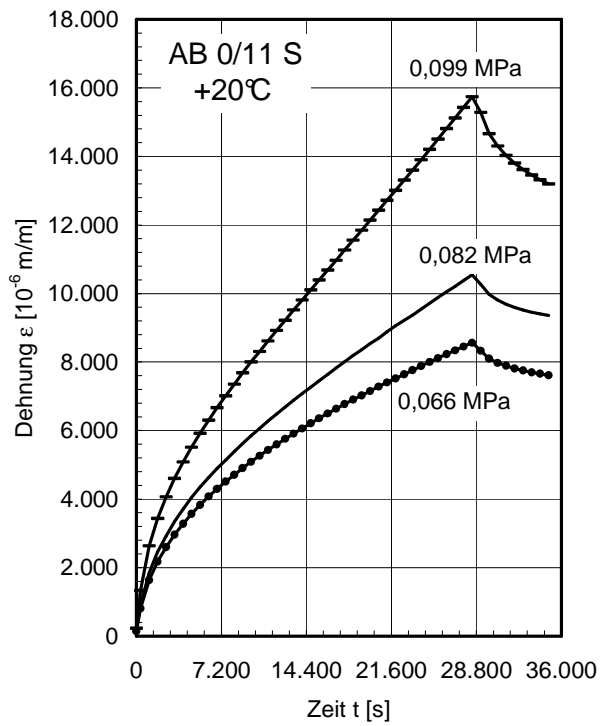


Abbildung A8-3: Gemittelte Dehnungsverläufe – AB 0/11 S

Tabelle A8-10: Ergebnisse der Retardationsversuche – AB 0/11 S, -25°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V_m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E_1	E_2	λ_1	λ_2	β
-25	2,352	2,350	AB29-4	3,07	48.984	51.670	1.709.800.000	232.080.000	84,32%
		2,351	AB14-3	2,91	37.676	65.413	1.713.199.933	196.495.616	43,03%
		2,351	AB28-5	2,75	32.757	127.720	3.808.400.000	40.268.000	51,14%
		2,351	Mittel	2,908	39.806	81.601	2.410.466.644	156.281.205	
		0,0005	Stabw.	0,1616	8.320,3	40.527,0	1.210.646.992,5	102.033.621,8	
		0,02%	Var.-K.	5,56%	20,90%	49,66%	50,22%	65,29%	
-25	2,587	2,585	AB13-2	3,03	27.869	90.262	1.582.300.000	228.249.997	79,67%
		2,586	AB30-1	2,90	26.627	48.110	1.934.699.999	148.569.784	72,08%
		2,586	AB30-3	2,71	26.309	94.010	1.891.199.999	77.989.585	84,42%
		2,586	Mittel	2,880	26.935	77.460	1.802.733.333	151.603.122	
		0,0005	Stabw.	0,1645	824,3	25.487,5	192.135.897,4	75.176.117,8	
		0,02%	Var.-K.	5,71%	3,06%	32,90%	10,66%	49,59%	
-25	3,057	3,056	AB 101-3	3,23	14.817	88.126	1.446.100.000	71.988.870	77,83%
		3,055	AB 138-1	3,07	19.578	98.107	1.357.300.004	232.089.993	77,27%
		3,055	AB 99-4	3,35	20.576	64.041	1.357.300.000	71.989.000	75,77%
		3,055	Mittel	3,218	18.324	83.425	1.386.900.001	125.355.954	
		0,0002	Stabw.	0,1418	3.077,4	17.513,0	51.268.702,6	92.434.389,1	
		0,01%	Var.-K.	4,41%	16,79%	20,99%	3,70%	73,74%	

Tabelle A8-11: Ergebnisse der Retardationsversuche – AB 0/11 S, -10°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V_m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E_1	E_2	λ_1	λ_2	β
-10	1,131	1,130	AB21-1	3,11	7.599	6.410	113.170.000	24.105.997	99,62%
		1,129	AB11-6	2,91	6.561	3.984	63.499.003	16.815.408	98,35%
		1,128	AB29-2	2,83	6.799	4.948	86.631.000	24.698.981	99,45%
		1,129	Mittel	2,948	6.986	5.114	87.766.667	21.873.462	
		0,0013	Stabw.	0,1456	543,6	1.221,2	24.854.965,3	4.390.425,7	
		0,11%	Var.-K.	4,94%	7,78%	23,88%	28,32%	20,07%	
-10	1,694	1,694	AB19-5	3,11	6.008	3.940	31.955.011	11.961.936	99,72%
		1,694	AB18-3	2,91	9.806	4.049	37.485.000	12.778.999	99,71%
		1,695	AB21-3	2,79	8.378	5.624	63.547.001	19.307.992	99,82%
		1,694	Mittel	2,935	8.064	4.538	44.329.004	14.682.976	
		0,0007	Stabw.	0,1632	1.918,5	942,3	16.871.388,5	4.026.161,8	
		0,04%	Var.-K.	5,56%	23,79%	20,77%	38,06%	27,42%	
-10	1,978	1,977	AB17-4	3,11	13.369	3.526	47.457.512	19.510.232	99,45%
		1,974	AB29-5	2,91	8.061	5.587	26.915.019	11.934.967	99,96%
		1,977	AB21-5	2,75	10.009	5.944	34.076.013	10.967.974	99,97%
		1,976	Mittel	2,921	10.480	5.019	36.149.515	14.137.724	
		0,0016	Stabw.	0,1821	2.685,2	1.305,2	10.427.035,4	4.677.782,2	
		0,08%	Var.-K.	6,23%	25,62%	26,01%	28,84%	33,09%	

Tabelle A8-12: Ergebnisse der Retardationsversuche – AB 0/11 S, +5°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
+5	0,324	0,319	AB27-1	3,15	913	270	4.479.000	1.082.100	99,91%
		0,321	AB28-4	2,99	611	180	3.821.900	507.190	99,87%
		0,321	AB30-2	2,83	621	256	4.323.900	1.039.998	99,83%
		0,320	Mittel	2,989	715	235	4.208.267	876.429	
		0,0011	Stabw.	0,1616	171,7	48,5	343.472,5	320.463,0	
		0,33%	Var.-K.	5,41%	24,01%	20,62%	8,16%	36,56%	
+5	0,485	0,483	AB29-1	3,11	831	251	2.584.200	687.270	99,96%
		0,482	AB17-2	2,95	1.387	239	2.545.600	768.631	99,95%
		0,481	AB27-2	2,83	816	251	2.705.300	898.800	99,95%
		0,482	Mittel	2,962	1.011	247	2.611.700	784.900	
		0,0008	Stabw.	0,1418	325,4	6,9	83.326,1	106.699,4	
		0,18%	Var.-K.	4,79%	32,17%	2,81%	3,19%	13,59%	
+5	0,583	0,580	AB18-1	3,11	1.281	351	1.731.828	771.631	99,99%
		0,579	AB11-2	2,95	1.535	295	1.590.359	385.571	99,94%
		0,578	AB28-6	2,83	1.549	321	1.744.896	503.987	99,97%
		0,579	Mittel	2,962	1.455	322	1.689.028	553.730	
		0,0011	Stabw.	0,1418	151,2	27,9	85.699,3	197.778,6	
		0,18%	Var.-K.	4,79%	10,39%	8,66%	5,07%	35,72%	

Tabelle A8-13: Ergebnisse der Retardationsversuche – AB 0/11 S, +20°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
+20	0,069	0,065	AB27-5	3,03	78	22	386.376	88.170	99,90%
		0,065	AB14-5	2,91	77	16	292.636	79.712	99,95%
		0,066	AB30-4	2,50	129	27	625.180	115.672	99,90%
		0,066	Mittel	2,814	95	22	434.731	94.518	
		0,0006	Stabw.	0,2749	29,9	5,4	171.464,4	18.801,4	
		0,84%	Var.-K.	9,77%	31,50%	24,86%	39,44%	19,89%	
+20	0,086	0,084	AB21-4	2,99	105	31	449.129	139.832	99,93%
		0,083	AB29-3	2,91	113	24	238.107	72.109	99,96%
		0,081	AB17-5	2,50	117	25	453.435	104.341	99,92%
		0,082	Mittel	2,800	111	27	380.224	105.427	
		0,0014	Stabw.	0,2597	6,1	3,5	123.095,4	33.874,9	
		1,64%	Var.-K.	9,27%	5,47%	12,84%	32,37%	32,13%	
+20	0,104	0,100	AB29-6	2,99	161	33	198.054	49.514	99,98%
		0,100	AB27-3	2,87	96	27	284.522	71.343	99,95%
		0,098	AB3-3	2,42	120	32	264.024	83.664	99,98%
		0,099	Mittel	2,760	126	31	248.867	68.174	
		0,0009	Stabw.	0,2977	32,9	3,1	45.182,6	17.294,4	
		0,90%	Var.-K.	10,79%	26,21%	9,95%	18,16%	25,37%	

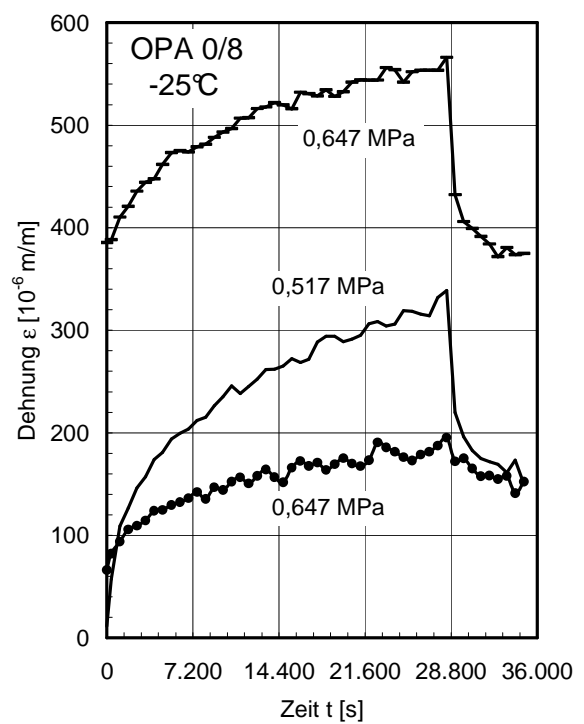
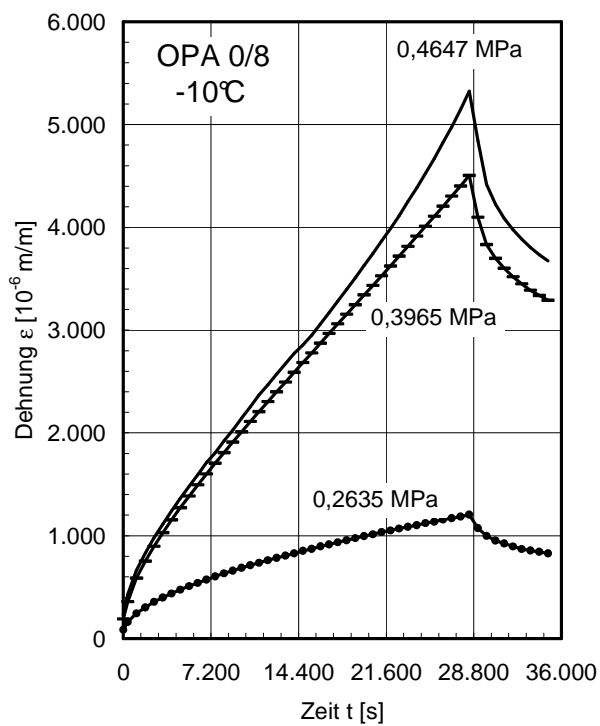
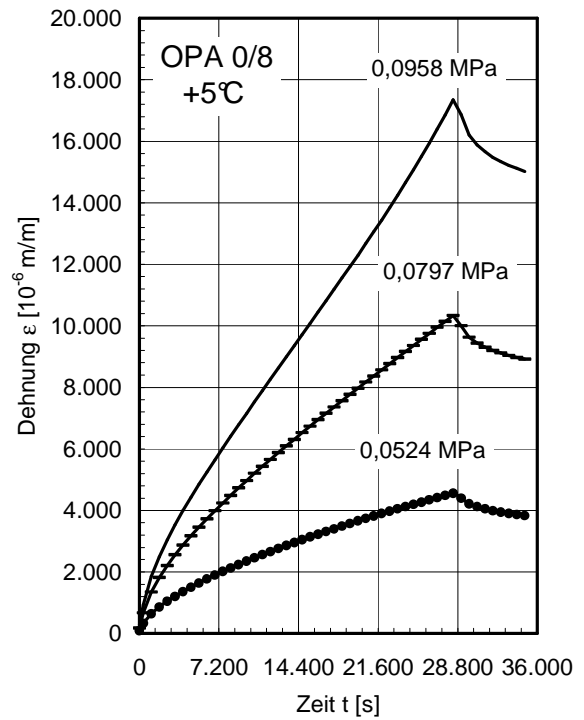
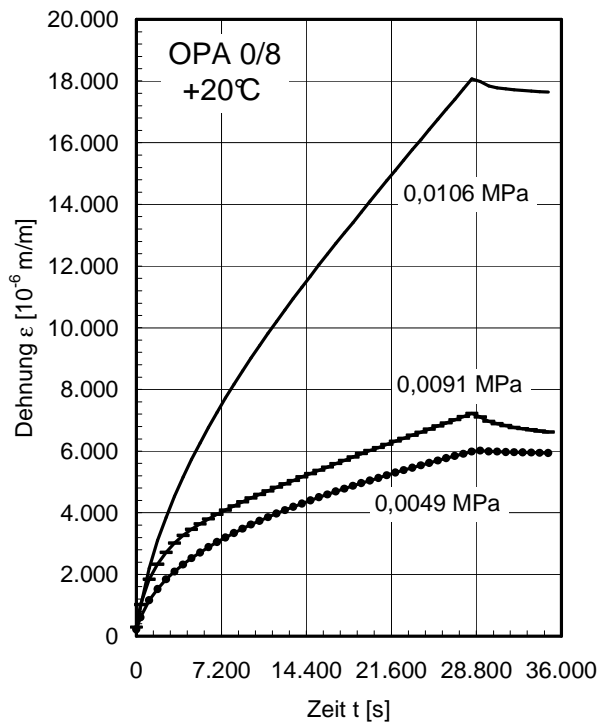


Abbildung A8-4: Gemittelte Dehnungsverläufe – OPA 0/8

Tabelle A8-14: Ergebnisse der Retardationsversuche – OPA 0/8, -25°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
-25	0,39	0,3875	OPA <u>10</u> -1	24,834	4.522,9	5.333,5	252.260.000,0	19.265.000,0	73,81%
		0,387	OPA 7-2	24,254	4.227,1	5.887,6	252.260.000,0	19.265.000,0	92,23%
		0,387	OPA 5-3	23,466	9.894,9	6.991,9	222.890.000,0	25.646.000,0	92,55%
		0,387	Mittel	24,185	6.215	6.071	242.470.000	21.392.000	
		0,0003	Stabw.	0,6867	3.190,4	844,3	16.956.777,4	3.684.072,1	
		0,07%	Var.-K.	2,84%	51,33%	13,91%	6,99%	17,22%	
	0,52	0,5172	OPA 9-5	24,627	1.418,3	4.177,6	169.700.000,0	17.961.000,0	92,20%
		0,517	OPA 31-2	23,549	1.358,4	6.529,5	169.700.000,0	17.960.999,9	68,81%
		0,517	Mittel	24,088	1.388	5.354	169.700.000	17.961.000	
		0,0001	Stabw.	0,7622	42,3	1.663,1	0,0	0,1	
		0,03%	Var.-K.	3,16%	3,05%	31,06%	0,00%	0,00%	
	0,651	0,648	OPA 32-3	23,798	16.032,0	6.865,1	145.270.000,0	19.909.000,0	84,16%
		0,647	OPA 7-4	24,544	15.262,9	8.815,7	115.979.981,8	16.273.944,9	99,99%
		0,647	OPA 31-5	23,590	5.780,4	2.939,0	115.979.981,1	16.273.942,7	85,88%
		0,647	Mittel	23,977	12.358	6.207	125.743.321	17.485.629	
		0,0006	Stabw.	0,5015	5.709,7	2.993,2	16.910.600,1	2.098.700,7	
		0,09%	Var.-K.	2,09%	46,20%	48,23%	13,45%	12,00%	

Tabelle A8-15: Ergebnisse der Retardationsversuche – OPA 0/8, -10°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
-10	0,264	0,267	OPA 32-4	23,176	2.083,4	747,0	11.672.000,0	3.947.000,0	99,70%
		0,263	OPA <u>10</u> -6	25,000	1.781,1	659,2	10.100.000,0	3.671.900,0	99,93%
		0,26323	OPA 7-1	24,461	1.720,3	728,1	10.519.000,0	3.726.300,0	99,84%
		0,264	Mittel	24,212	1.862	711	10.763.667	3.781.733	
		0,0022	Stabw.	0,9372	194,5	46,2	814.059,2	145.686,8	
		0,85%	Var.-K.	3,87%	10,45%	6,50%	7,56%	3,85%	
	0,402	0,397	OPA 32-5	23,425	1.707,5	803,2	4.026.599,3	2.661.000,1	99,98%
		0,398	OPA 5-1	24,959	2.508,9	721,4	2.168.828,3	765.269,1	99,97%
		0,397	OPA 34-6	24,461	1.439,0	799,9	2.415.601,6	1.533.975,4	99,95%
		0,397	Mittel	24,281	1.885	775	2.870.343	1.653.415	
		0,0005	Stabw.	0,7826	556,6	46,3	1.008.920,5	953.492,7	
		0,13%	Var.-K.	3,22%	29,53%	5,98%	35,15%	57,67%	
	0,469	0,465	OPA 7-6	25,539	1.827,3	1.200,5	2.759.999,5	1.472.300,0	99,74%
		0,465	OPA 8-1	24,378	4.333,1	719,8	3.632.085,8	621.994,4	99,76%
		0,464	OPA 12-5	23,425	1.639,9	1.200,4	2.339.302,3	1.130.939,7	99,98%
		0,465	Mittel	24,447	2.600	1.040	2.910.463	1.075.078	
		0,0003	Stabw.	1,0589	1.503,7	277,5	659.394,9	427.896,4	
		0,07%	Var.-K.	4,33%	57,83%	26,67%	22,66%	39,80%	

Tabelle A8-16: Ergebnisse der Retardationsversuche – OPA 0/8, +5°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
5	0,057	0,0513	OPA 2-5	23,673	214,3	33,3	657.807,7	224.212,3	99,92%
		0,0522	OPA 1-2	24,544	136,4	40,6	328.414,3	213.426,8	99,97%
		0,0538	OPA 26-4	25,083	214,7	33,6	871.241,3	281.409,0	99,90%
		0,052	Mittel	24,433	188	36	619.154	239.683	
		0,0013	Stabw.	0,7113	45,1	4,2	273.470,0	36.536,2	
		2,41%	Var.-K.	2,91%	23,92%	11,63%	44,17%	15,24%	
	0,085	0,0791	OPA 2-2	24,627	142,5	38,9	248.869,9	146.287,8	99,98%
		0,0803	OPA 9-1	24,212	147,7	45,0	333.721,3	187.866,1	99,98%
		0,080	Mittel	24,420	145	42	291.296	167.077	
		0,0008	Stabw.	0,2932	3,7	4,3	59.999,0	29.400,3	
		1,06%	Var.-K.	1,20%	2,56%	10,24%	20,60%	17,60%	
	0,1	0,09527	OPA 1-6	25,083	252,8	47,5	145.740,1	83.700,9	99,95%
		0,09498	OPA 12-6	25,083	130,6	47,8	199.626,0	98.097,0	99,99%
		0,095	Mittel	25,083	192	48	172.683	90.899	
		0,0002	Stabw.	0,0000	86,4	0,3	38.103,1	10.179,5	
		0,22%	Var.-K.	0,00%	45,09%	0,54%	22,07%	11,20%	
	0,102	0,09576	OPA 12-1	24,876	220,8	44,1	204.883,1	101.202,2	99,99%
		0,09616	OPA 1-5	24,461	491,4	54,7	145.855,6	50.507,1	99,97%
		0,0974	OPA 10-3	24,378	205,9	59,1	417.594,5	229.145,7	99,96%
		0,096	Mittel	24,572	306	53	256.111	126.952	
		0,0009	Stabw.	0,2665	160,7	7,7	142.929,1	92.061,0	
		0,89%	Var.-K.	1,08%	52,51%	14,57%	55,81%	72,52%	

Tabelle A8-17: Ergebnisse der Retardationsversuche – OPA 0/8, +20°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
20	0,01	0,00442	OPA 2-1	25,580	6,38	0,91	16.718,0	4.899,7	99,98%
		0,00494	OPA 10-5	23,425	5,42	1,80	143.008,4	12.439,1	99,20%
		0,005	Mittel	24,502	6	1	79.863	8.669	
		0,0004	Stabw.	1,5244	0,7	0,6	89.300,8	5.331,1	
		7,83%	Var.-K.	6,22%	11,48%	46,37%	111,82%	61,49%	
	0,014	0,00997	OPA 2-3	24,502	7,96	7,24	139.257,5	27.187,4	97,65%
		0,00799	OPA 2-4	23,466	5,80	1,41	57.040,1	15.881,2	99,69%
		0,00945	OPA 10-2	25,580	14,92	3,35	104.027,9	6.924,4	99,71%
		0,009	Mittel	24,516	10	4	100.109	16.664	
		0,0010	Stabw.	1,0573	4,8	3,0	41.248,6	10.154,2	
		11,24%	Var.-K.	4,31%	49,86%	74,25%	41,20%	60,93%	
	0,017	0,01104	OPA 1-4	23,590	9,99	0,86	22.921,2	17.656,1	99,85%
		0,01106	OPA 10-6	25,332	11,32	1,60	36.272,2	7.348,6	99,96%
		0,00981	OPA 26-3	24,420	11,30	3,80	29.162,8	17.641,7	99,98%
		0,011	Mittel	24,447	11	2	29.452	14.215	
		0,0007	Stabw.	0,8710	0,8	1,5	6.680,2	5.946,9	
		6,73%	Var.-K.	3,56%	7,02%	73,12%	22,68%	41,83%	

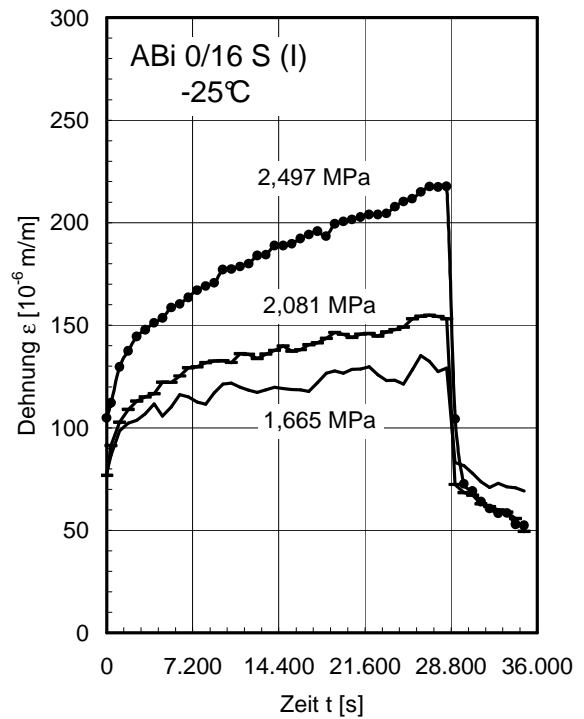
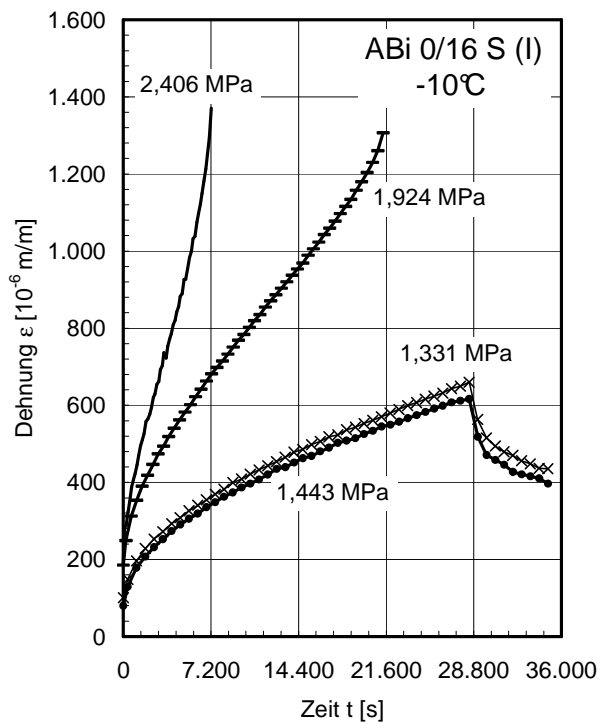
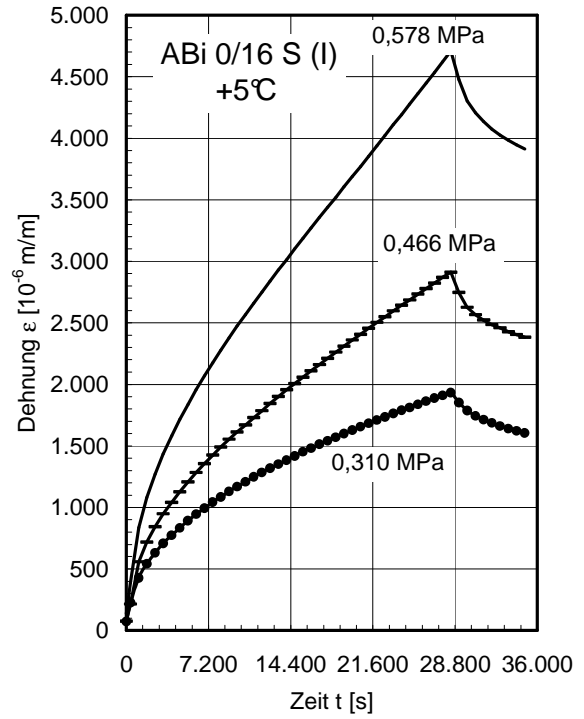
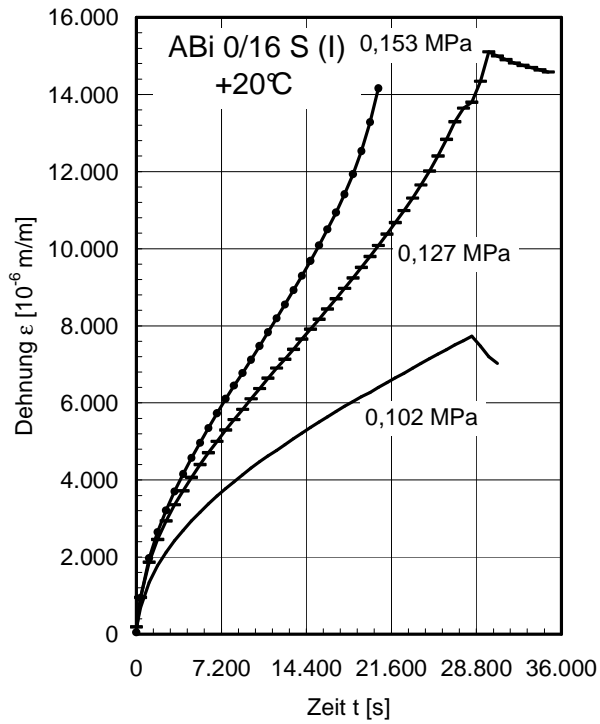


Abbildung A8-5: Gemittelte Dehnungsverläufe – ABi 0/16 S

Tabelle A8-18: Ergebnisse der Retardationsversuche – ABi 0/16 S (I), -25°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
-25	1,665	1,664	BM 135-5	4,535	18.980	38.380	45.560.000.000	225.100.000	69,02%
		1,664	BM 133-4	3,341	14.602	43.886	4.127.100.000	81.975.000	57,79%
		1,664	Mittel	3,938	16.791	41.133	24.843.550.000	153.537.500	
		0,0000	Stabw.	0,8438	3.095,7	3.893,3	29.297.484.554,2	101.204.658,1	
		0,00%	Var.-K.	21,43%	18,44%	9,47%	117,93%	65,92%	
-25	2,081	2,080	BM 138-5	4,535	15.790	40.934	5.813.000.000	191.210.001	75,66%
		2,080	BM 154-5	4,932	26.149	53.053	1.801.300.000	135.620.000	81,47%
		2,079	BM 138-3	3,341	41.535	69.179	1.823.400.000	136.070.000	74,54%
		2,080	Mittel	4,269	27.825	54.389	3.145.900.000	154.300.000	
		0,0006	Stabw.	0,8280	12.954,3	14.169,6	2.309.802.785,9	31.965.790,1	
		0,03%	Var.-K.	19,39%	46,56%	26,05%	73,42%	20,72%	
-25	2,497	2,496	BM 137-1	4,932	40.018	29.130	1.154.000.000	14.718.000	86,75%
		2,496	BM 138-1	4,137	18.388	24.731	1.534.600.000	222.390.000	93,59%
		2,496	BM 138-3*	3,341	25.863	94.652	1.820.400.000	330.530.000	90,65%
		2,496	Mittel	4,137	28.090	49.504	1.503.000.000	189.212.667	
		0,0000	Stabw.	0,7955	10.985,5	39.160,8	334.321.940,7	160.498.773,9	
		0,00%	Var.-K.	19,23%	39,11%	79,11%	22,24%	84,82%	

Tabelle A8-19: Ergebnisse der Retardationsversuche – ABi 0/16 S (I), -10°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
-10	1,443	1,441	BM 134-1	4,137	9.257	7.619	129.940.000	44.558.000	99,38%
		1,441	BM 139-4	3,739	13.193	8.369	124.160.000	36.900.000	98,98%
		1,441	BM 140-4	3,739	11.441	8.135	129.940.000	44.558.000	99,40%
		1,441	Mittel	3,872	11.297	8.041	128.013.333	42.005.333	
		0,0000	Stabw.	0,2297	1.972,0	383,8	3.337.084,5	4.421.348,3	
		0,00%	Var.-K.	5,93%	17,46%	4,77%	2,61%	10,53%	
-10	1,331	1,329	BM 141-4	4,972	7.790	8.134	103.960.000	28.511.000	97,96%
		1,329	BM 145-4	5,728	18.145	7.093	100.000.000	31.488.000	97,98%
		1,329	BM 149-5	4,813	8.179	8.654	108.520.000	32.565.000	94,55%
		1,329	BM 148-1	5,609	12.578	11.033	39.031.000	7.059.800	96,18%
		1,329	Mittel	5,280	11.673	8.729	87.877.750	24.905.950	
		0,0000	Stabw.	0,4551	4.830,4	1.667,8	32.750.039,1	12.020.342,3	
		0,00%	Var.-K.	8,62%	41,38%	19,11%	37,27%	48,26%	
-10	1,924	1,922	BM 135-1	4,932	17.150	9.762	26.004.000	1.654.400	99,16%
		1,921	BM 138-5	4,535	9.324	9.684	47.800.000	14.486.000	99,85%
		1,922	BM 95-3	2,944	8.187	9.157	63.974.000	29.662.000	99,89%
		1,922	Mittel	4,137	11.554	9.534	45.926.000	15.267.467	
		0,0006	Stabw.	1,0524	4.879,7	328,8	19.054.241,8	14.020.143,8	
		0,03%	Var.-K.	25,44%	42,23%	3,45%	41,49%	91,83%	
-10	2,406	2,404	BM 103-5	6,086	17.024	13.236	7.406.700	869.157	98,23%
		2,404	BM 134-5	4,336	12.171	12.259	30.786.999	7.664.095	90,85%
		2,404	BM 122-3	2,944	12.708	13.014	30.787.000	7.664.100	99,74%
		2,404	Mittel	4,455	13.968	12.836	22.993.566	5.399.117	
		0,0000	Stabw.	1,5746	2.660,7	512,0	13.498.622,4	3.923.060,9	
		0,00%	Var.-K.	35,34%	19,05%	3,99%	58,71%	72,66%	

Tabelle A8-20: Ergebnisse der Retardationsversuche – ABi 0/16 S (I), +5°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
+5	0,310	0,308	BM 36-1	4,216	1.300	420	7.421.400	1.856.500	99,11%
		0,307	BM 70-4	3,620	1.707	626	10.889.000	2.259.900	99,57%
		0,308	BM 61-2	4,972	1.307	406	7.136.800	1.728.600	99,88%
		0,308	Mittel	4,269	1.438	484	8.482.400	1.948.333	
		0,0001	Stabw.	0,6778	232,9	123,2	2.089.028,9	277.299,3	
		0,03%	Var.-K.	15,88%	16,20%	25,46%	24,63%	14,23%	
+5	0,466	0,462	BM 70-1	4,654	2.022	498	4.890.264	1.578.706	99,95%
		0,464	BM 6-3	3,739	2.839	657	10.985.000	1.997.001	99,71%
		0,463	BM 37-3	4,177	1.625	667	6.994.300	2.024.100	99,72%
		0,463	Mittel	4,190	2.162	608	7.623.188	1.866.602	
		0,0011	Stabw.	0,4576	618,9	94,8	3.095.654,2	249.693,3	
		0,24%	Var.-K.	10,92%	28,62%	15,60%	40,61%	13,38%	
+5	0,578	0,573	BM 62-3	4,654	1.598	512	4.034.900	1.260.000	99,98%
		0,575	BM 70-3	3,779	2.637	540	6.254.299	1.260.001	99,96%
		0,575	BM 29-1	4,177	1.693	582	4.882.400	1.680.500	99,96%
		0,575	Mittel	4,203	1.976	545	5.057.200	1.400.167	
		0,0011	Stabw.	0,4382	574,7	35,4	1.119.977,5	242.775,5	
		0,20%	Var.-K.	10,42%	29,09%	6,50%	22,15%	17,34%	

Tabelle A8-21: Ergebnisse der Retardationsversuche – ABi 0/16 S (I), +20°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
+20	0,102	0,099	BM 38-1	5,410	219	40	495.047	123.056	99,87%
		0,099	BM 35-1	4,455	189	42	457.748	147.216	99,96%
		0,099	BM 70-2	3,262	194	53	825.740	217.793	99,79%
		0,099	Mittel	4,375	200	45	592.845	162.689	
		0,0003	Stabw.	1,0762	16,4	7,0	202.553,0	49.227,6	
		0,34%	Var.-K.	24,60%	8,20%	15,45%	34,17%	30,26%	
+20	0,127	0,124	BM 38-2	4,375	154	51	624.685	158.774	99,93%
		0,123	BM 38-2b	4,375	212	56	214.050	76.888	99,95%
		0,124	BM 36-3	3,580	413	66	434.821	150.010	99,98%
		0,124	Mittel	4,110	260	58	424.518	128.557	
		0,0009	Stabw.	0,4593	136,2	7,9	205.511,2	44.960,8	
		0,72%	Var.-K.	11,17%	52,43%	13,75%	48,41%	34,97%	
+20	0,153	0,147	BM 37-1	5,489	549	73	221.424	68.219	99,93%
		0,151	BM 35-5	3,978	294	73	557.778	186.226	99,97%
		0,150	BM 30-2	3,898	439	72	280.105	112.736	99,97%
		0,149	Mittel	4,455	427	72	353.102	122.394	
		0,0019	Stabw.	0,8965	127,9	0,7	179.666,0	59.593,3	
		1,27%	Var.-K.	20,12%	29,95%	1,02%	50,88%	48,69%	

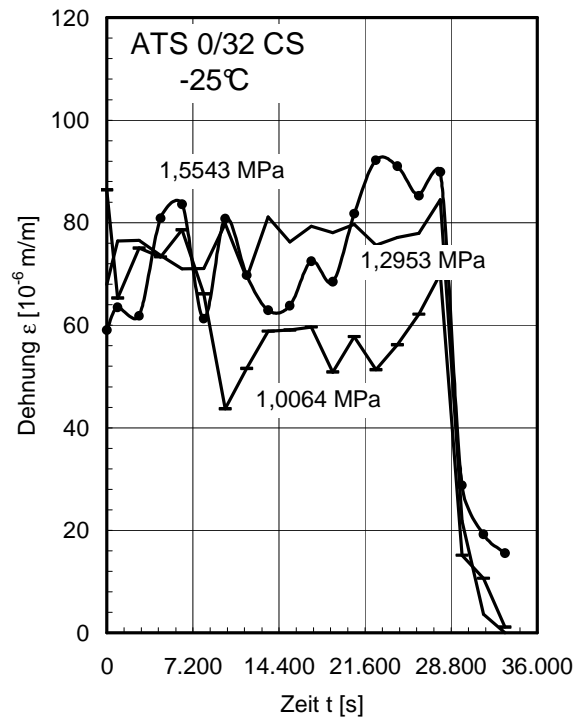
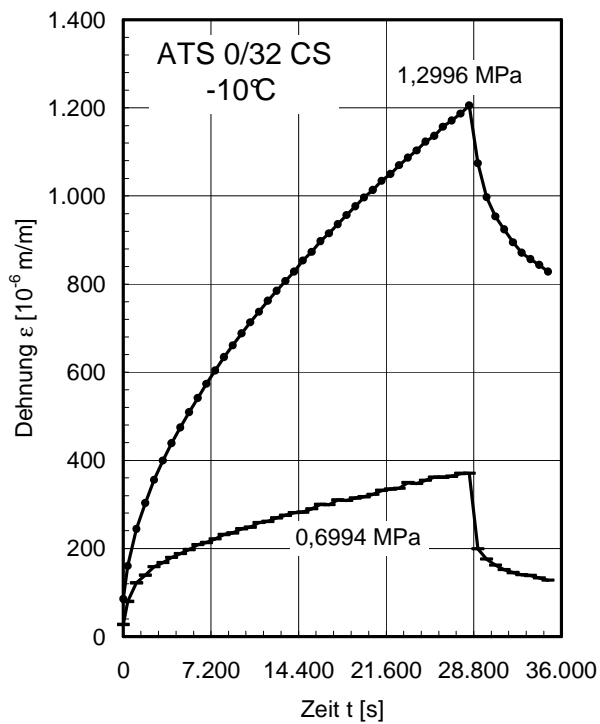
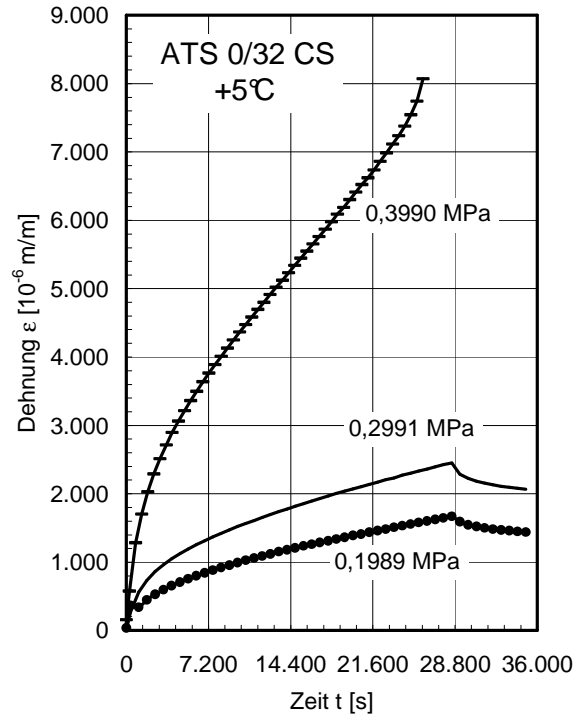
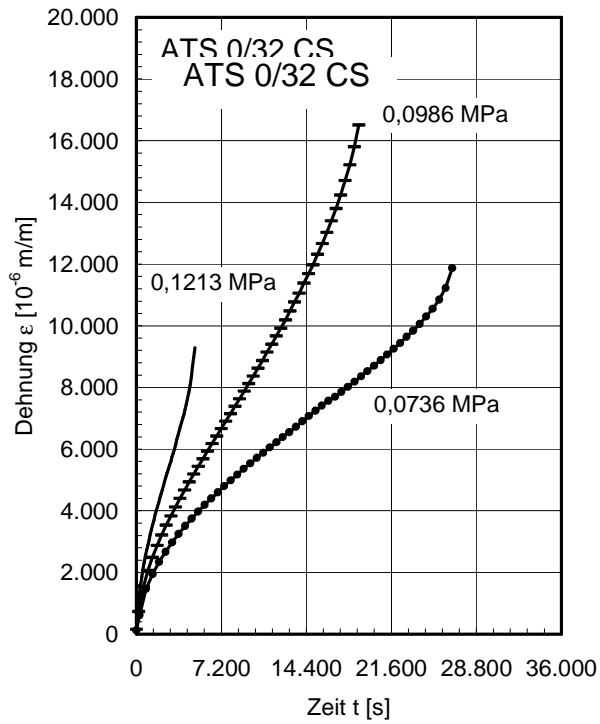


Abbildung A8-6: Gemittelte Dehnungsverläufe – ATS 0/32 CS

Tabelle A8-22: Ergebnisse der Retardationsversuche – ATS 0/32 CS, -25°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
-25	1,555	1,554	T 35-1	6,876	1.050.855,0	29.614,9	2.673.799.999,7	1.635.298,3	0,12%
		1,554	T 151-3	6,523	1.050.851,5	25.234,7	2.673.799.999,7	1.635.298,0	6,95%
		1,554	Mittel	6,699	1.050.853,2	27.424,8	2.673.799.999,7	1.635.298,2	
		0,0001	Stabw.	0,2501	2,5	3.097,2	0,0	0,3	
		0,01%	Var.-K.	3,73%	0,00%	11,29%	0,00%	0,00%	
	1,037	1,037	T 150-1	6,994	1.050.851,5	20.066,8	2.673.799.999,7	1.635.298,4	0,50%
		1,036	T 67-2	5,737	1.349.631,1	79.857,4	1.324.200.002,2	1.808.996,9	12,38%
		1,036	T 150-3	6,562	12.112,4	304.730,6	1.324.201.834,9	1.802.140,6	3,52%
		1,036	Mittel	6,431	804.198	134.885	1.774.067.279	1.748.812	
		0,0002	Stabw.	0,6388	702.045,2	150.098,0	779.191.392,8	98.365,3	
		0,02%	Var.-K.	9,93%	87,30%	111,28%	43,92%	5,62%	
	1,296	1,295	T 151-1	7,073	20.800,6	73.446,9	4.457.200.000,0	1.348.600,0	25,70%
		1,295	T 142-3	6,444	21.197,5	484.219,9	5.484.700.023,0	20.304.769,1	0,49%
		1,295	Mittel	6,758	20.999	278.833	4.970.950.012	10.826.685	
		0,0001	Stabw.	0,4445	280,6	290.460,4	726.552.234,0	13.404.035,7	
		0,01%	Var.-K.	6,58%	1,34%	104,17%	14,62%	123,81%	

Tabelle A8-23: Ergebnisse der Retardationsversuche – ATS 0/32 CS, -10°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
-10	1,3	1,300	T 83-3	6,012	10.134,5	6.771,1	70.245.000,0	14.767.000,0	99,44%
	0,700	0,700	T 55-1	6,798	12.636,8	7.836,1	107.889.982,2	29.990.768,2	91,89%
		0,699	T 84-1	7,191	7.951,2	4.222,3	70.172.000,0	11.569.000,0	98,49%
		0,700	T 83-2	5,894	8.247,6	11.238,2	162.210.000,0	32.882.000,0	90,26%
		0,699	Mittel	6,627	9.612	7.766	113.423.994	24.813.923	
		0,0003	Stabw.	0,6649	2.623,8	3.508,5	46.267.886,5	11.561.176,0	
		0,04%	Var.-K.	10,03%	27,30%	45,18%	40,79%	46,59%	
	1,000	0,999	T 107-3	7,151	5.667,7	4.896,8	59.547.000,0	13.091.000,0	99,55%
		0,999	T 65-2	6,483	9.035,4	6.901,4	95.779.000,0	18.091.000,0	99,20%
		0,999	T 88-2	5,894	9.834,5	6.957,7	103.540.000,0	19.427.000,0	98,31%
		0,999	Mittel	6,509	8.179	6.252	86.288.667	16.869.667	
		0,0001	Stabw.	0,6291	2.211,4	1.173,9	23.481.819,2	3.339.905,0	
		0,01%	Var.-K.	9,66%	27,04%	18,78%	27,21%	19,80%	

Tabelle A8-24: Ergebnisse der Retardationsversuche – ATS 0/32 CS, +5°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
5	0,200	0,199	T 83-1	7,112	861,7	179,7	2.474.500,0	578.040,0	99,87%
		0,199	T68-2b		1.443,9	162,6	6.394.200,0	627.739,6	99,51%
		0,199	T 68-1	6,876	1.232,2	285,5	5.541.400,0	1.011.000,0	99,54%
		0,199	T 107-2	6,876	1.834,4	739,2	11.818.000,0	2.762.700,0	98,09%
		0,199	Mittel	6,955	1.343	342	6.557.025	1.244.870	
		0,0001	Stabw.	0,1361	406,4	270,5	3.890.281,7	1.030.212,8	
		0,03%	Var.-K.	1,96%	30,26%	79,14%	59,33%	82,76%	
	0,300	0,299	T 95-2	5,697	1.506,6	336,7	6.111.900,0	978.680,0	99,85%
	0,400	0,399	T 65-1	6,876	881,8	180,7	2.174.955,7	331.687,3	99,85%
		0,399	T 89-1	7,073	1.422,9	231,8	1.839.699,9	401.350,0	99,93%
		0,399	Mittel	6,974	1.152	206	2.007.328	366.519	
		0,0001	Stabw.	0,1389	382,6	36,2	237.061,7	49.258,9	
		0,02%	Var.-K.	1,99%	33,20%	17,53%	11,81%	13,44%	

Tabelle A8-25: Ergebnisse der Retardationsversuche – ATS 0/32 CS, +20°C

Temperatur T [°C]	Spannung σ [MPa]		PK	V _m [%]	Burgers-Anpassung				
	Soll	Ist			E ₁	E ₂	λ_1	λ_2	β
20	0,075	0,074	T 88-3	7,701	191,6	30,6	165.056,5	52.232,2	99,95%
		0,074	T 98-3	6,876	115,7	33,9	291.911,0	84.383,3	99,98%
		0,074	T 69-2	4,637	172,7	35,0	390.480,0	124.180,0	99,97%
		0,074	Mittel	6,405	160	33	282.483	86.932	
		0,0001	Stabw.	1,5859	39,5	2,3	113.007,1	36.041,5	
		0,17%	Var.-K.	24,76%	24,71%	6,97%	40,00%	41,46%	
	0,100	0,099	T 41-2	7,269	245,6	66,1	146.514,9	66.977,3	99,99%
		0,098	T 81-3	6,758	276,1	56,0	136.238,6	56.394,2	99,97%
		0,099	T 89-2	5,737	183,6	49,2	208.533,5	69.979,7	99,96%
		0,099	Mittel	6,588	235	57	163.762	64.450	
		0,0004	Stabw.	0,7803	47,1	8,5	39.112,0	7.136,6	
		0,38%	Var.-K.	11,84%	20,04%	14,85%	23,88%	11,07%	
	0,125	0,118	T 42-1	7,387	1.131,8	87,1	57.439,7	25.426,3	99,96%
		0,124	T 89-3	6,640	186,0	43,7	144.961,8	42.709,2	99,97%
		0,122	T 55-2	5,697	445,1	72,4	201.248,0	66.737,6	99,96%
		0,121	Mittel	6,575	588	68	134.550	44.958	
		0,0032	Stabw.	0,8467	488,8	22,0	72.467,3	20.747,2	
		2,68%	Var.-K.	12,88%	83,17%	32,55%	53,86%	46,15%	

A 8.2 Temperaturabhängigkeit der Regressionsparameter

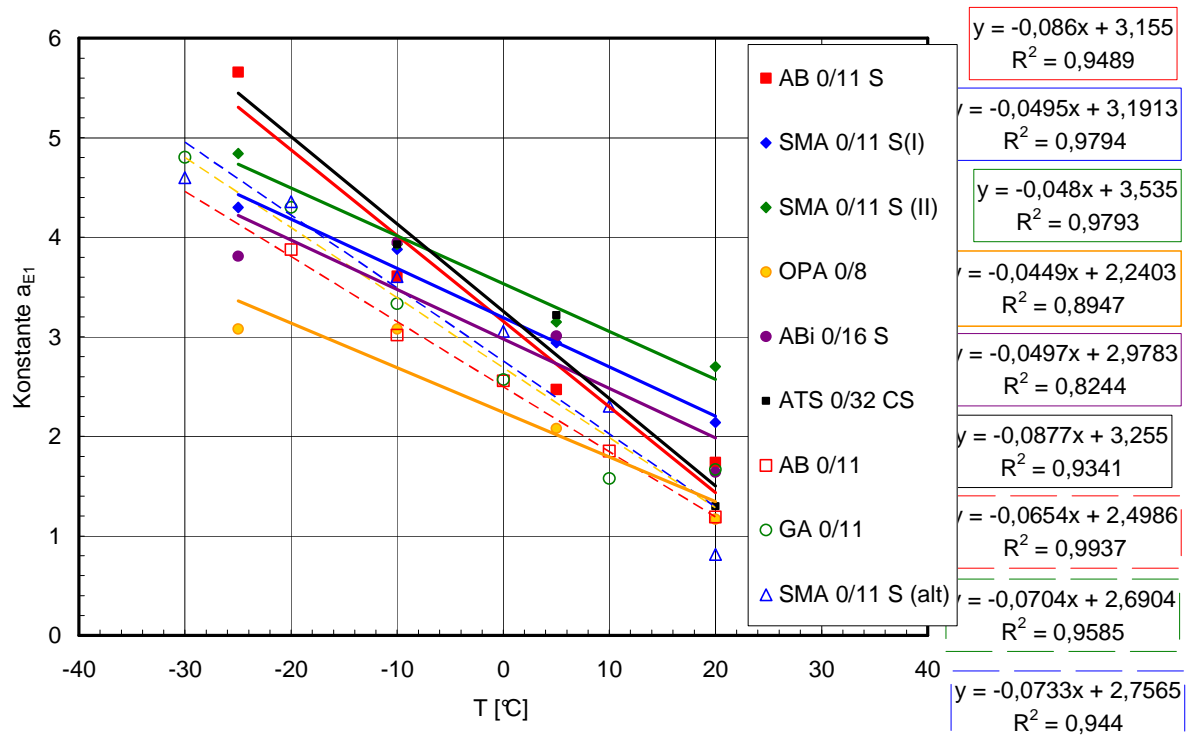


Abbildung A8-7: Temperaturabhängigkeit der Konstante a_{E1}

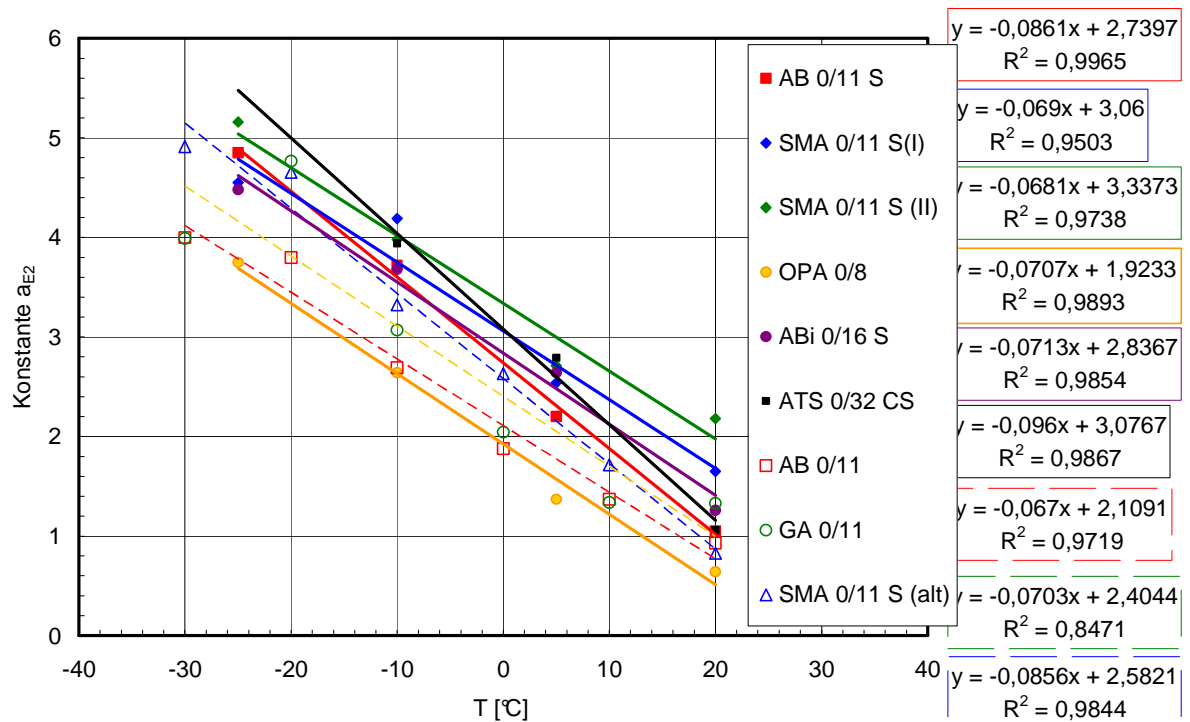


Abbildung A8-8: Temperaturabhängigkeit der Konstante a_{E2}

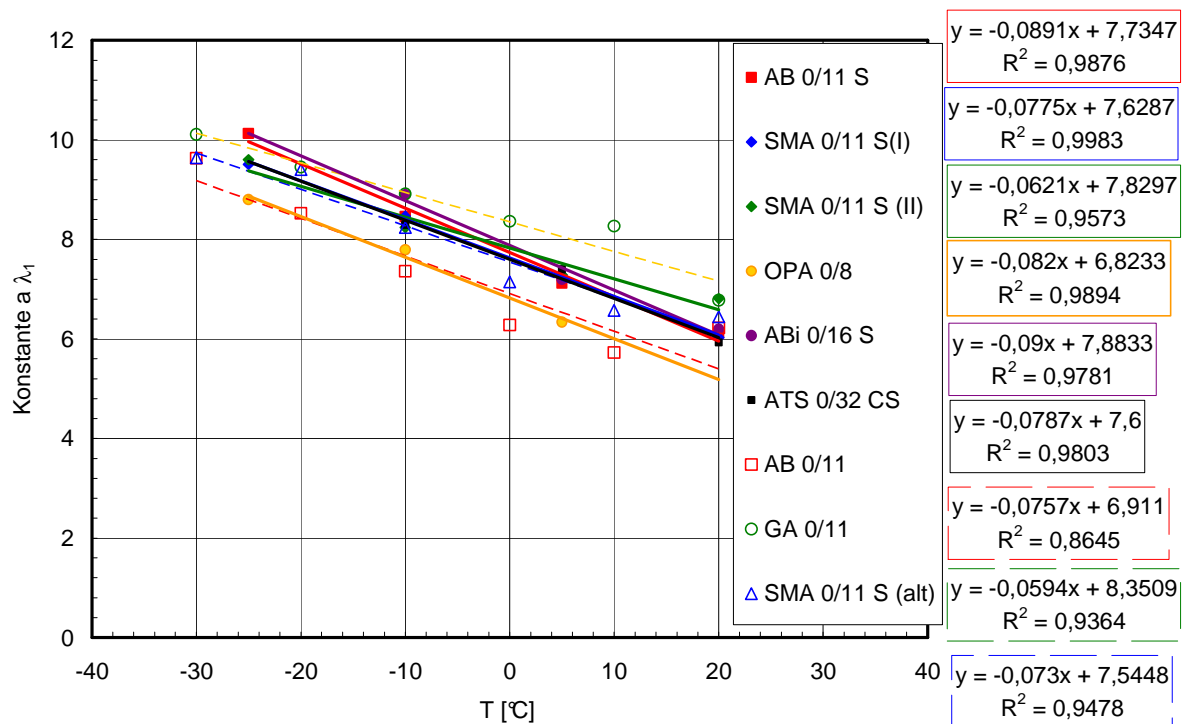


Abbildung A8-9: Temperaturabhängigkeit der Konstante a_{λ_1}

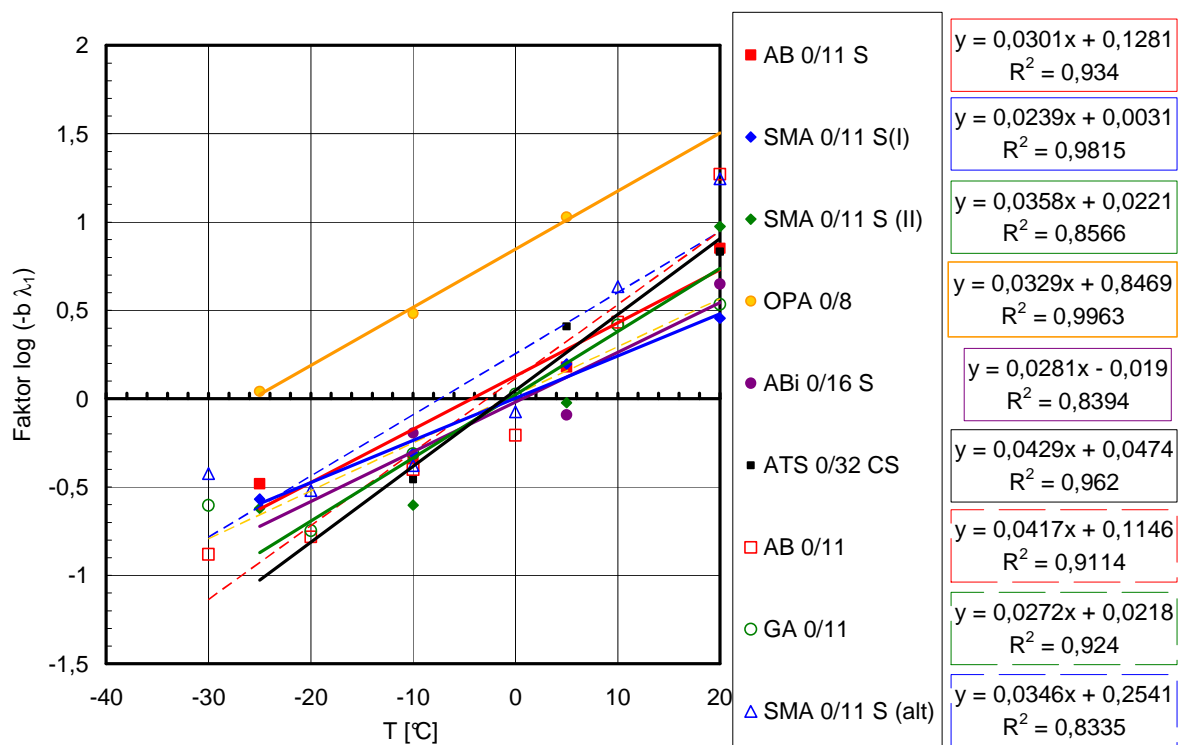


Abbildung A8-10: Temperaturabhängigkeit der Faktoren b_{λ_1}

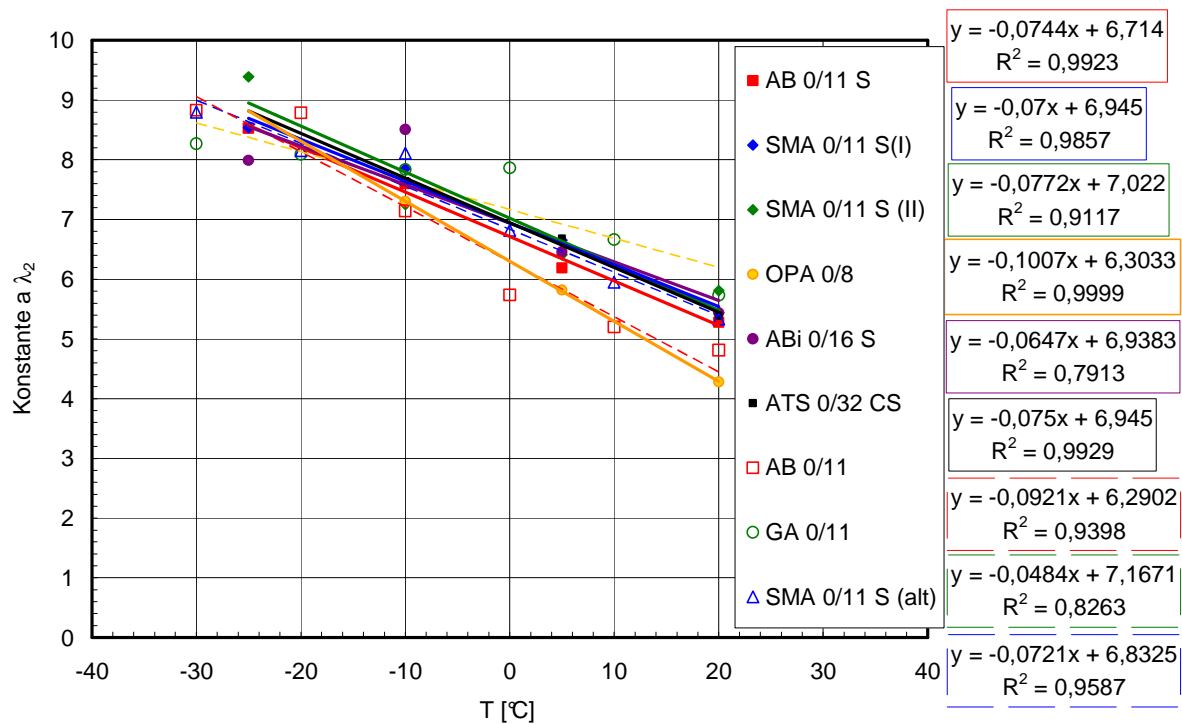


Abbildung A8-11: Temperaturabhängigkeit der Konstanten a_{λ_2}

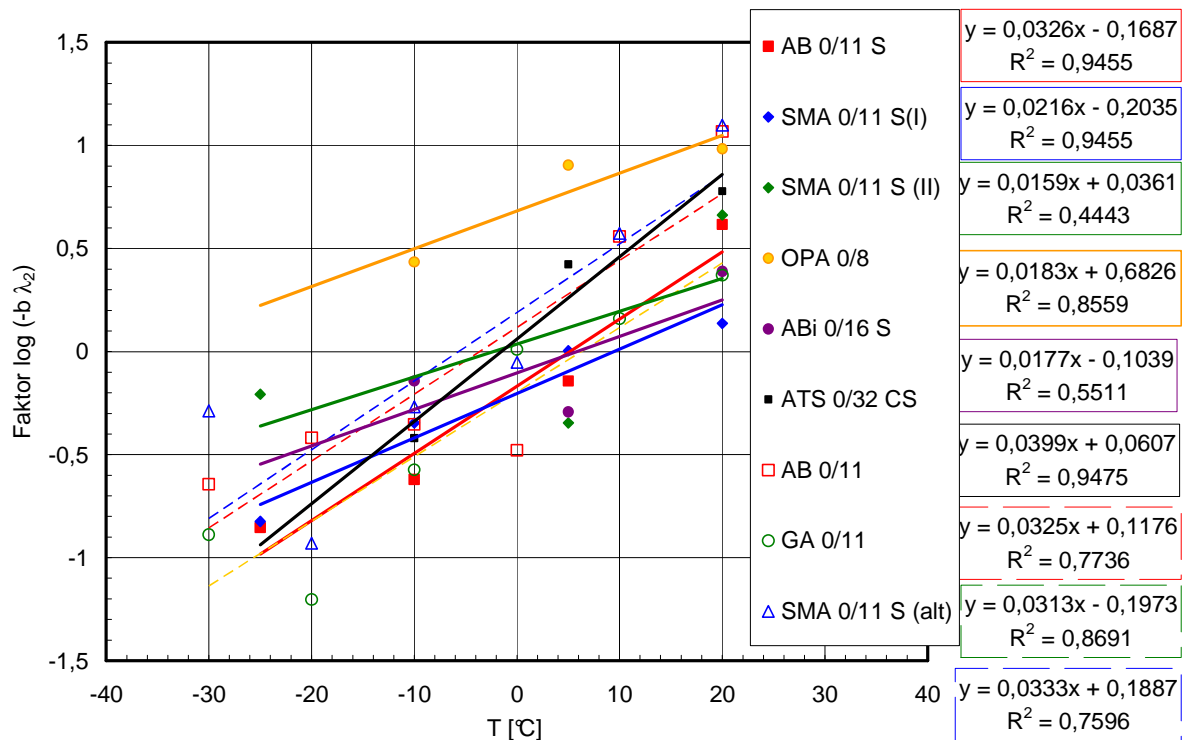


Abbildung A6-12: Temperaturabhängigkeit der Faktoren b_{λ_2}

A 9 Berechnung des Dehnungsverlaufs mit dem Burgers-Modell unter Berücksichtigung der Schädigung

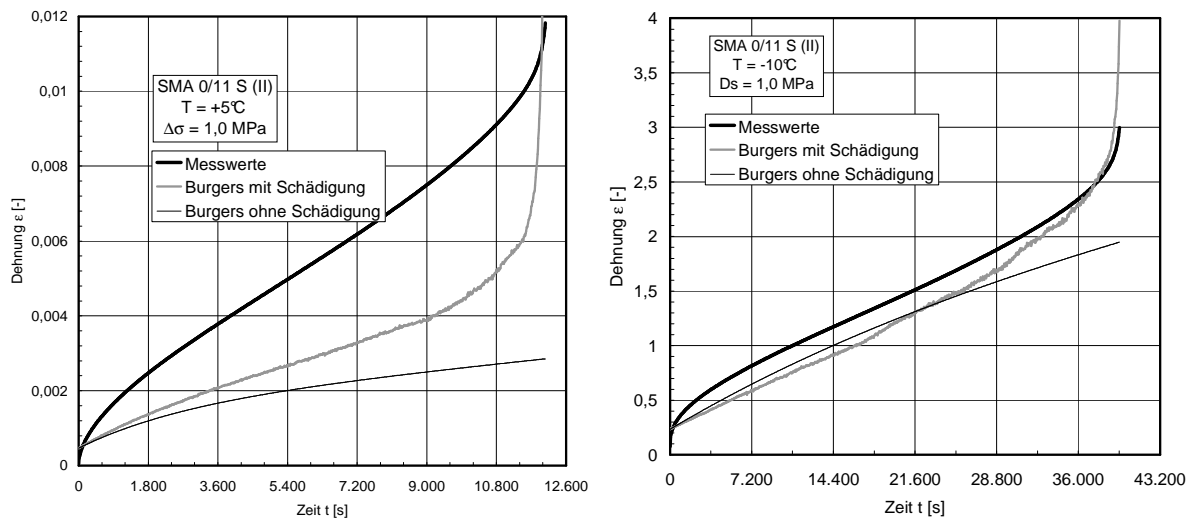


Abbildung A 9-1 Vergleich der mittels Burgers-Modells berechneten Dehnungsverläufe mit den Messwerten aus einaxialen Zug-Schwellversuchen: SMA 0/11 S (II)

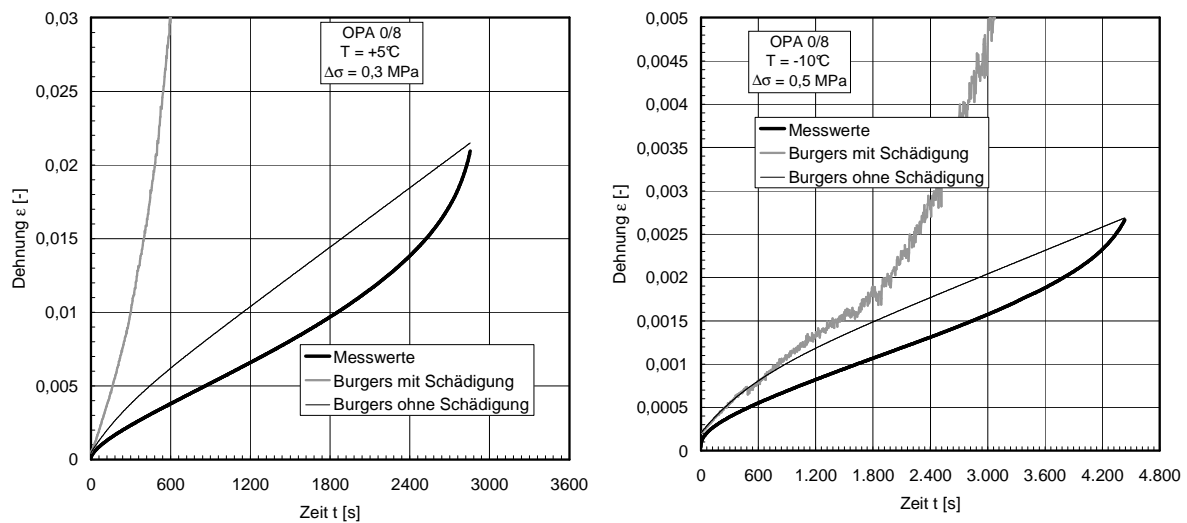


Abbildung A 9-2 Vergleich der mittels Burgers-Modells berechneten Dehnungsverläufe mit den Messwerten aus einaxialen Zug-Schwellversuchen: OPA 0/8

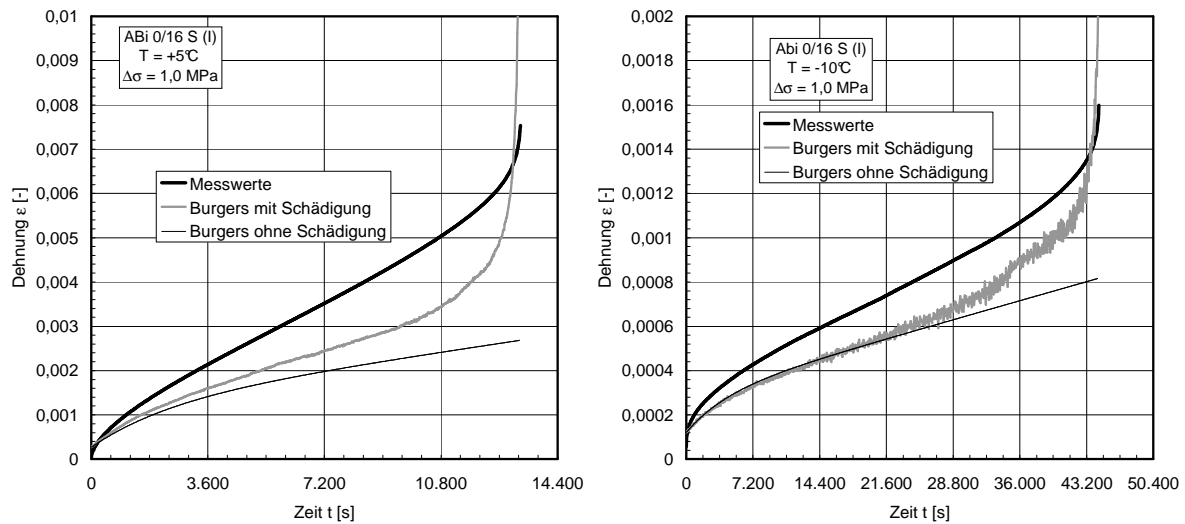


Abbildung A 9-3 Vergleich der mittels Burgers-Modells berechneten Dehnungsverläufe mit den Messwerten aus einaxialen Zug-Schwellversuchen: ABi 0/16 S (I)

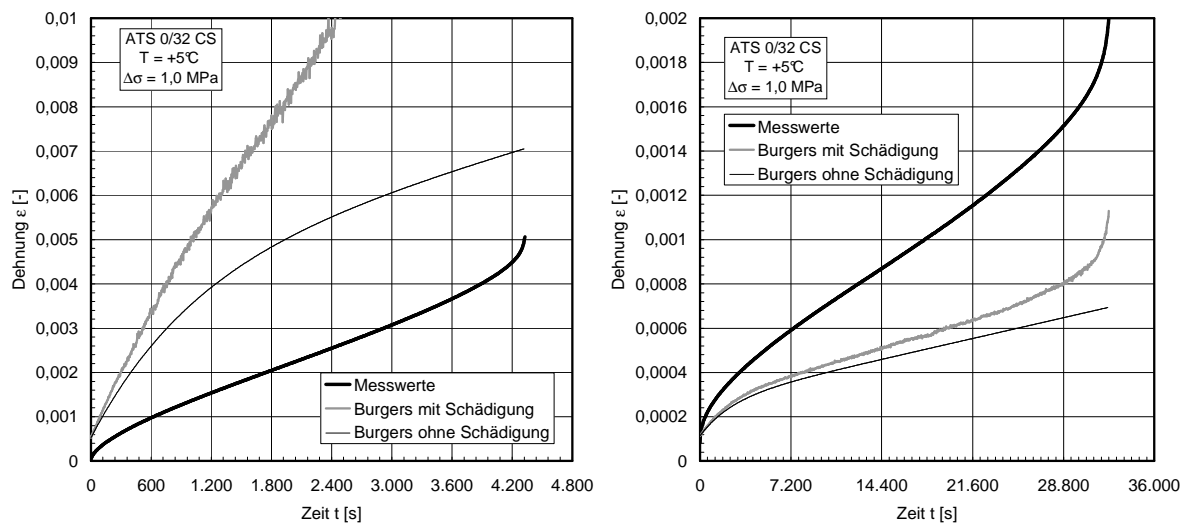


Abbildung A 9-4 Vergleich der mittels Burgers-Modells berechneten Dehnungsverläufe mit den Messwerten aus einaxialen Zug-Schwellversuchen: ATS 0/323 CS